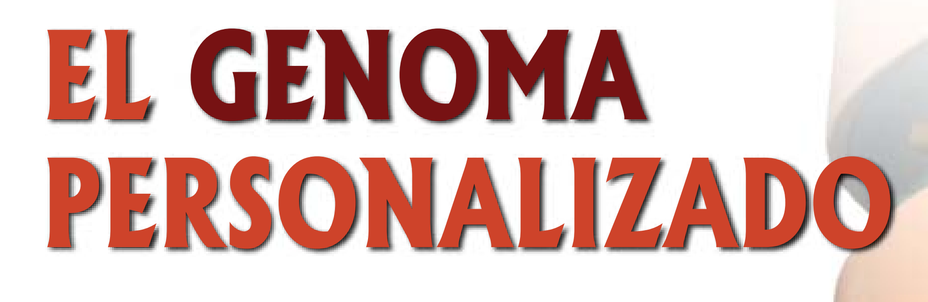
EL ORIGEN DE LAS ENANAS MARRONES • EL CEREBRO MATERNAL

INVESTIGACION y CIENCIA

MARZO 2006
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



EL TSUNAMI DEL INDICO

PLANTAS Y CAMBIO CLIMATICO

EL GLOBO COMETARIO DE VICENZO CORONELLI

BIOPELICULAS

PRUEBAS TOXICOLOGICAS CON ANIMALES

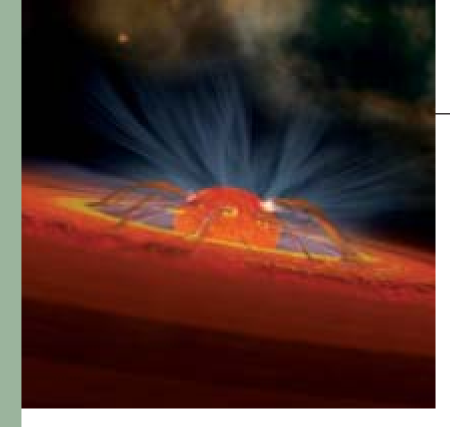




Edición española de
SCIENTIFIC
AMERICAN

Marzo de 2006

Número 354



6
Origen de las enanas marrones
Subhanjoy Mohanty y Ray Jayawardhana

Con su desafío a las teorías de la formación de estrellas y planetas, las enanas marrones, a medias estrellas, a medias planetas, podrían llevarlas a una mayor perfección.

24
El tsunami del Indico
Eric L. Geist, Vasily V. Titov y Costas E. Synolakis

Después de las trágicas consecuencias del tsunami acontecido en el océano Indico en diciembre de 2004, los científicos y los centros de alerta se encuentran mejor preparados para generar modelos que describan estas olas monstruosas y predecirlas.



42
Plantas y cambio climático
Juan B. Arellano y Javier De Las Rivas

Los gases de invernadero constituyen una amenaza contra la integridad de la biosfera. Para hacer frente a ese reto, se cuenta con dos complejos enzimáticos de la fotosíntesis.

52
El cerebro maternal
Craig Howard Kinsley y Kelly G. Lambert

El embarazo y la maternidad cambian la estructura del cerebro de las hembras de mamífero. En virtud de esa transformación, las madres se muestran diligentes con sus pequeños y les prestan los cuidados oportunos.

60
El globo cometario de Vincenzo Coronelli
Wilhelm Seggewiss

En el globo celeste de Tréveris construido por Vincenzo Coronelli figura el cometa de 1661 descrito por Johannes Hevelius. Pudo tratarse del mismo cometa Ikeya-Zhang que retornó en 2002.



3
Hace...
50, 100 y 150 años.

4
Apuntes
Ecología...
Enfermedades infecciosas...
Física práctica...
Astrofísica...
Salud...
Zoología.

32
Ciencia y sociedad
Gotas de cristal líquido...
Bordetella...
Química selectiva...
Amenaza contra
la radioastronomía...
La granada.



40
De cerca
Planeta de medusas.





14
El genoma personalizado
George M. Church

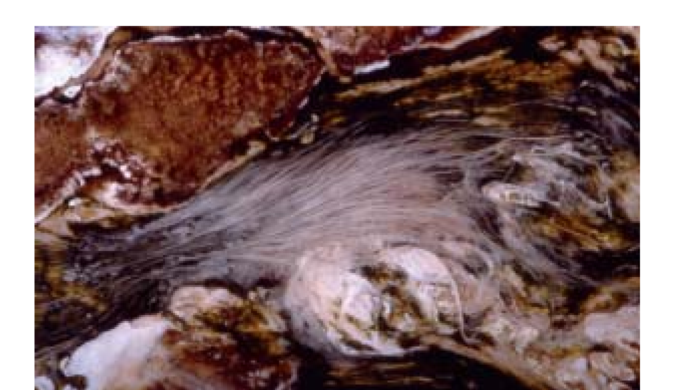
Así que pasen menos de diez años, contaremos con nuevas técnicas de secuenciación, más rápidas y baratas, que facilitarán el acceso a la información génica.

68
Pruebas toxicológicas con animales
Alan M. Goldberg y Thomas Hartung

Reducir el sufrimiento de los animales trae consigo a menudo un beneficio inesperado: conseguir ensayos más precisos y seguros.

76
Biopelículas
Joe J. Harrison, Raymond J. Turner, Lyriam L. R. Marques y Howard Ceri

Los avances en el conocimiento de estas comunidades microbianas están desencadenando una revolución que puede transformar la microbiología.

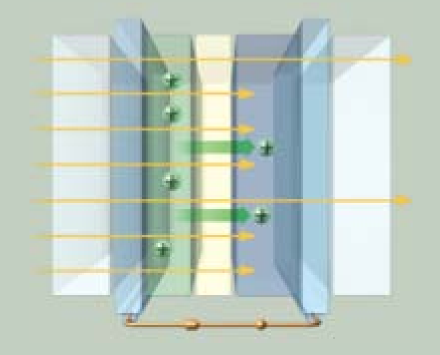


84
CURIOSIDADES DE LA FÍSICA
Un golpe transmite el siguiente,
por Norbert Treitz



88
JUEGOS MATEMÁTICOS
El número *h*,
por Juan M.R. Parrondo

90
IDEAS APLICADAS
Vidrio inteligente,
por Mark Fischetti



92
CIENCIA Y GASTRONOMÍA
El color verde de las judías,
por Hervé This

93
LIBROS
Galileo
Mecánica.





DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero: *Origen de las enanas marrones*; Felipe Cortés: *El genoma personalizado*; Sònia Ambròs: *El tsunami del Indico*; Juan Manuel González Mañas: *El cerebro maternal* y *Biopelículas*; Encarna Hidalgo: *El globo cometario de Vicenzo Coronelli*; M.ª José Báguena: *Pruebas toxicológicas con animales*; Teodoro Vives: *Amenaza contra la radioastronomía*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; M.ª Rosa Vallès: *Ciencia y gastronomía*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Kenn Brown

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	**Dos años**
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

ESTRÉS DE COMBATE. «Para aprovechar al máximo sus efectivos, los jefes militares deben conocer a fondo los efectos del estrés de combate. Ello les permitirá estimar si una unidad se halla lista para el combate, durante cuánto tiempo podrá luchar eficazmente y qué tiempo de descanso necesita antes de retomar la acción. Durante la guerra de Corea, las fuerzas armadas efectuaron un estudio del estrés de combate (correspondía a la primera fase de un proyecto a largo plazo). Una cosa es cierta: por su agudeza, el estrés de combate requiere una recuperación de días, no de horas. La tradicional cura que se dispensa a los combatientes (una comida caliente y una buena noche de sueño) resulta insuficiente.»

CONMOCIONES TERRESTRES. «Ya ha aparecido el tercero de los volúmenes de la serie que Immanuel Velikovsky dedica a su original reinterpretación de la historia de la Tierra; no hay que leer demasiadas páginas para descubrir que en él abundan generosamente los dislates, lo mismo que en sus predecesores. A raíz de la publicación del primer volumen, *Worlds in Collision*, en 1950, los ánimos se encresparon: los científicos dijeron que Velikovsky estaba loco; los editores, que los científicos eran unos intolerantes; Velikovsky dio a entender que él era un genio martirizado. El público está desorientado. Sin embargo, se supone que en una controversia científica unos científicos discuten con otros científicos, no que éstos riñen con editorialistas, críticos literarios y redactores de publicidad sobre las reseñas de las contraportadas.»

...cien años

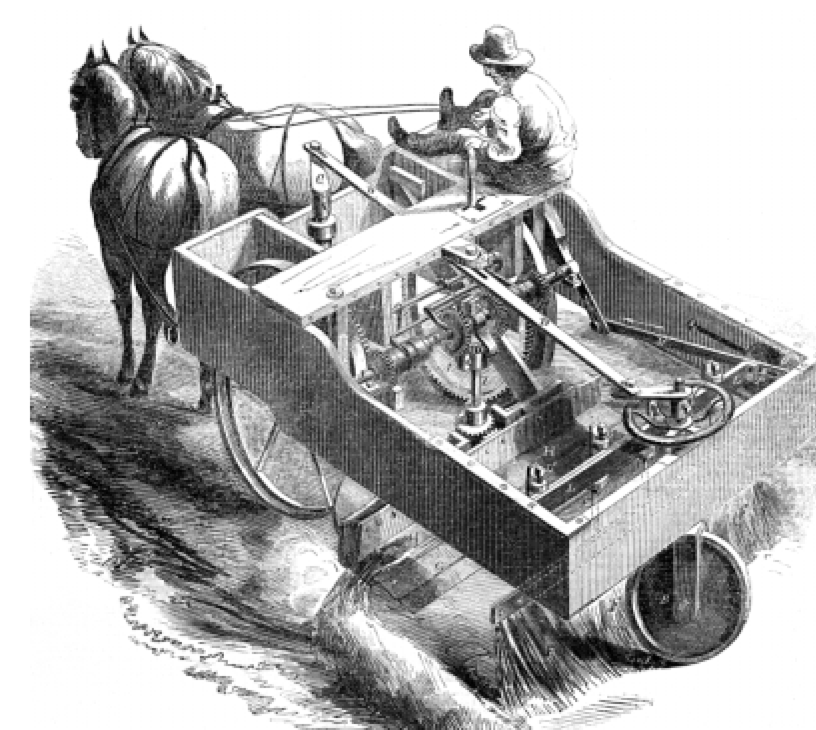
LA ERA DE LOS ACORAZADOS. «La reciente botadura del acorazado 'Dreadnought' en Portsmouth, fue un acontecimiento de una trascendencia fuera de lo común, pues se trata de un tipo de navío completamente nuevo, que inicia una era en el arte de la construcción naval militar. El 'Dreadnought' es el buque de guerra más rápido, más fuertemente protegido y más potentemente armado que se haya construido hasta la fecha. Los avances que más impresionan son los que incorpora su armamento. En los combates de la guerra ruso-japonesa se evidenció que los peores daños se debían a los proyectiles de los calibres de diez y doce pulgadas, resultando los cañones de calibres inferiores ineficaces para las distancias a las que se libraron los encuentros. Por esa razón se han suprimido los cañones de seis pulgadas.»

GRAN ZIMBABUE. «En Rhodesia se han descubierto en fecha reciente unas extrañas ruinas. El mejor ejemplo de su arquitectura sea quizás el así llamado "templo" de Zimbabue (que se traduce como "casas de piedra"). Los objetos hallados abarcan una gran variedad: cañones de hierro y bronce, utensilios de plata, loza, cuentas, objetos de vidrio, etcétera. Revelan la presencia portuguesa en algún momento. Se cree que los artículos de hierro y cobre representan una más reciente ocupación cafre, mientras que el oro labrado en platos, brazaletes, collares, jaeces y arreos se considera representativo de los antiguos artífices, que, en busca del preciado metal, se adentraron en lo que era para ellos el último confín del mundo.»

...ciento cincuenta años

BARREDORA DE CALLES. «Philadelphia es, creemos, la única ciudad norteamericana donde las máquinas de barrer calles han hallado uso permanente. A no tardar mucho, el barrido manual de las calles será completamente desplazado por las máquinas. Su adopción libre contribuirá de forma notable a la salubridad y pulcritud de nuestras ciudades. La máquina que aquí se ilustra consiste en un vehículo ligero de tres ruedas. Los escobones oscilantes hacen subir la suciedad por la pequeña plancha inclinada, hasta la cinta giratoria, que la deposita en gavillas sobre el suelo; luego, se carga fácilmente con palas en carros volquete.»

ORO Y TIERRA. «En Coon Hollow (California), y otros lugares igualmente afortunados, los montes se han rebajado al nivel del llano merced al proceso siguiente: se lleva agua hasta la cima de un cerro de tierra aurífera; se introduce el agua en una manguera muy resistente de lona, piel o caucho; con pólvora se dispara un torrente de agua a una presión de seis o siete atmósferas. Una persona se encarga de dirigir ese potente chorro de agua, que hace las veces de ariete que desprende y desmorona la tierra de la ladera. Ello provoca un aluvión de lodo sobre unas compuertas, donde unos rastrillos retienen el oro.»



Barrido de calles, con una máquina tirada por caballos, 1856.

ECOLOGIA

Arrecifes sanos

Ante la degradación de los arrecifes coralinos promovida por la contaminación, la sobreexplotación y el cambio climático, sus gestores están implantando "zonas marinas protegidas"; es decir, prohibidas para la pesca. Uno de los primeros estudios sobre los efectos ecológicos de esa veda permite ya barruntar el acierto de la medida. Un grupo de la Universidad de Exeter estudió un parque marino de las Bahamas acotado de pesca desde 1986. Había dudas de si el resurgimiento del mero, un depredador, no exterminaría al pez loro, especie que favorece el crecimiento de los corales al alimentarse de algas. El grupo descubrió que el consumo neto de algas se duplicó. En efecto, el pez loro abunda más al cesar la pesca, pero al mero no le resulta fácil alimentarse de peces del tamaño de aquél.

—J. R. Minkel



Los peces loro favorecen la supervivencia del coral porque se alimentan con las algas que impiden el crecimiento del invertebrado.

ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Letalidad a prueba

Con unos platos de azúcar podríamos determinar la letalidad de una cepa de la gripe. Para infectar el cuerpo, el virus se sirve de la hemaglutinina, proteína vírica que se adhiere, en la superficie celular, a los glúcidos que contienen ácidos siálicos. Un equipo del Instituto Scripps de Investigación ha elaborado un repertorio de 200 hidratos de carbono y glucoproteínas que representan los principales tipos de moléculas a las que la hemaglutinina puede unirse. Se sometieron a prueba ocho cepas de la gripe distintas, incluida la mortífera de 1918. Descubrieron que bastaba un par de alteraciones en la hemaglutinina para transformar una cepa aviar en una cepa que afectaría a los seres humanos. Explicaría por qué la gripe de 1918, que tanto se asemeja a la del virus aviar, fue tan devastadora.

—Charles Q. Choi

FISICA PRACTICA

¿Por qué se echa sal en invierno sobre las superficies heladas?



En breve: la sal provoca la fusión del hielo. Toda superficie cubierta de hielo tiene charquitos de agua líquida. Al aplicar sal a tales superficies, la sal se disuelve. El agua líquida tiene una constante dieléctrica muy grande, lo que permite que los iones de la sal (los iones sódicos, cargados positivamente, y los iones cloruro, cargados negativamente) se separen. Esos iones se hidratan, es decir, se unen a las moléculas de agua circundantes. Tal proceso, la solvatación, genera calor, que a su vez provoca la fusión de porciones microscópicas de la superficie del hielo. Una parte considerable de la sal esparcida sobre una gran superficie llega a derretir así hielo. Y los automóviles, al rodar, fuerzan la penetración de la sal en el hielo, lo que provoca todavía una mayor hidratación. Buena parte de la sal gruesa aplicada en invierno sobre las carreteras es químicamente idéntica a la sal de mesa. La única diferencia es que la sal gruesa ha cristalizado en piezas mucho mayores, mientras que la sal de mesa ha sido molida hasta dar a los granos un tamaño uniforme. Para fundir el hielo de nuestras calles también se emplea, casi tan a menudo como la sal, el cloruro cálcico, manufacturado a partir de salmueras y de otros materiales naturales.

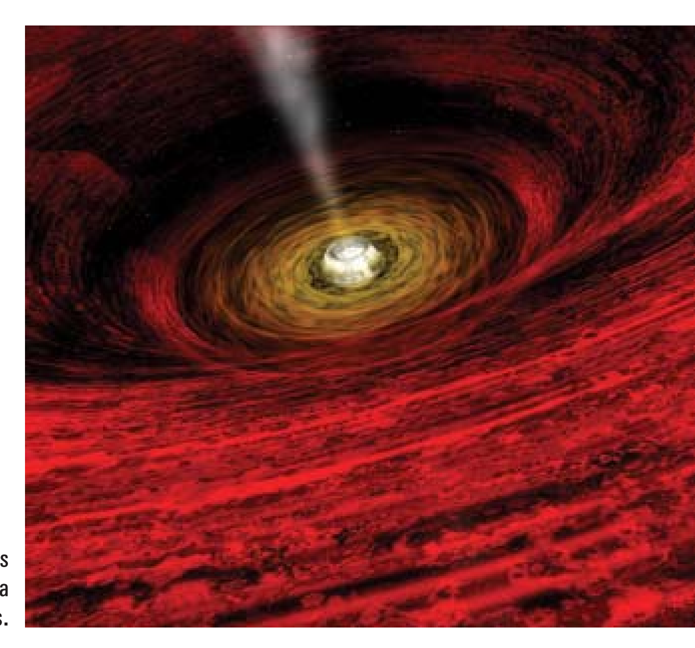
—John Margrave, Universidad Rice

ASTROFISICA

Un canal hacia el agujero negro

Un esporádico destello de un agujero negro, del que no se había visto actividad alguna desde hace diez años, ha respaldado una hipótesis a la que se recurre en ocasiones para calcular una de las dos propiedades más importantes de un agujero negro: su giro alrededor de sí mismo (la otra es la masa). La materia, al rotar en torno a un agujero negro, emite luz perpendicularmente al radio orbital, como un faro. La masa y el giro del agujero negro abren un "surco" en el espacio-tiempo. Las diversas alteraciones que imprime en la órbita se traducen en fluctuaciones de la radiación. En 1996, el agujero negro GRO J655-40 emitió rayos X según un patrón que sugería la existencia de ese surco; luego, al cabo de pocos meses, se hizo la oscuridad. En 2005, gas procedente de una estrella acompañante volvió a quedar atrapado por el agujero; el sistema se reactivó durante ocho meses largos. Tal y como se esperaba, se ha observado el mismo patrón de frecuencias; da entender que se trata de una propiedad fundamental.

—J. R. Minkel



La materia que cae en espiral al interior de un agujero negro emite haces de luz. En el sistema del agujero negro GRO J1655, ha seguido la misma trayectoria en dos episodios separados por nueve años.

SALUD

Resistencia a los insecticidas

Un aspecto muy delicado de toda campaña contra la malaria es el desarrollo de resistencia a los plaguicidas. Cuando en Kwazulu-Natal la resistencia a los piretroides recomendó volver al DDT, el mosquito resistente era la especie *Anopheles funestus*; en 2003 se comunicaba el descubrimiento en esa región sudafricana de indicios de resistencia al DDT por parte de una especie distinta, *Anopheles arabiensis.* En el sur de México *Anopheles albimanus* mostraba una fuerte resistencia al DDT (y en menor grado a otros insecticidas); tras años de aplicar DDT, las autoridades pasaron a rociar con piretroides de manera más selectiva e integrada con otros métodos. En la reunión de noviembre de 2005 de la Iniciativa Multilateral sobre la Malaria, en Yaoundé, Camerún, donde intervinieron centenares de científicos especializados en paludismo, se anunciaron los resultados de un estudio sobre la resistencia en el propio Camerún: en las plantaciones y arrozales del norte los insectos detoxificaban los piretroides; en las zonas boscosas tropicales del oeste, una mutación genética insensibilizaba el sistema nervioso de los mosquitos al DDT y los piretroides; en la costa y en las regiones centrales, se daban a veces las dos formas de resistencia. La relación entre resistencia y eficacia no siempre era directa. La resistencia generalizada en ciertas zonas africanas de *Anopheles gambiae* a los piretroides no impedía que las mosquiteras tratadas con esos insecticidas redujesen, quizá por su naturaleza repelente, el número de casos de paludismo infantil.

ZOOLOGIA

Sentido y sensibilidad



Los narvales lucen un incisivo en espiral de casi dos metros y medio de longitud. Les hace parecer un unicornio marino. Creían algunos que estas ballenas de cuatro y pico metros de largo empleaban ese diente para romper los hielos árticos; otros conjeturaban que servía de lanza en las justas entre machos. En realidad, podría tratarse de un sensor gigante útil para la navegación y la caza. Mediante la microscopía electrónica de dos colmillos de macho, se ha descubierto que un solo cuerno contiene del orden de 10 millones de nervios, que van de la superficie a la pulpa. No es que genere reacciones dolorosas al frío; informa de las variaciones de la temperatura del agua, de los gradientes de presión y de la concentración de partículas y presas.

—Charles Q. Choi

El cuerno de los narvales constituye, así se cree, un refinado sensor.

1. LAS ENANAS MARRONES, con un tamaño parecido al de Júpiter y masa de docenas de planetas Júpiter juntas, constituyen una suerte de cruce de planeta y estrella. Presentan características de ambos tipos de cuerpos celestes. En sus primeros años de vida dominan las tendencias estelares. Las observaciones más recientes prueban que la mayoría de las enanas marrones jóvenes están rodeadas, lo mismo que las estrellas, por discos de gas y polvo donde se podrían formar asteroides y planetas.

Origen de las enanas marrones

Con su desafío a las teorías de la formación de estrellas y planetas, las enanas marrones, a medias estrellas, a medias planetas, podrían llevarlas a una mayor perfección

Subhanjoy Mohanty
y Ray Jayawardhana

DON DIXON

¿Qué es un planeta? Parece una pregunta fácil, pero la respuesta se torna cada vez más compleja. Por una parte, la línea que separa los planetas de cuerpos menores resulta muy confusa. El año pasado, se halló un cuerpo mayor que Plutón en el borde del sistema solar, lo que avivó el viejo debate en torno a Plutón: ¿es un planeta genuino? Si lo es, ¿por qué no habrían de serlo los grandes asteroides? Se ha hablado menos de la confusión en el extremo superior de la escala planetaria, es decir, la división entre planetas y estrellas.

Esta separación parecía muy clara. Las estrellas brillan con su propia luz, mientras que los planetas reflejan la luz de la estrella en cuyo alrededor giran. En el lenguaje riguroso de la física, las estrellas tienen masa suficiente para mantener en su interior, durante un largo tiempo, la fusión estable del hidrógeno que las vuelve luminosas. Nacen del colapso de nubes de gas interestelar. Por otra parte, los planetas son demasiado insignificantes y fríos para iniciar la fusión. Se cree que surgen de la congelación de los restos que rodean a las estrellas recién formadas. Son escombros de la formación estelar.

En los últimos años, sin embargo, se han descubierto unos objetos que rompen con estos límites. A caballo entre los planetas y las estrellas, compartiendo muchas características de unos y otras, sin poder adscribirse ni a unos ni a otras, aportan información valiosa sobre ambos tipos de astros y de su generación. Hablamos de las enanas marrones.

Con una masa típica entre 12 y 75 veces la del planeta Júpiter, resultan demasiado ligeras para alcanzar las altas temperaturas centrales necesarias para la fusión normal de los núcleos de hidrógeno. Poseen, sin embargo, peso suficiente para quemar deuterio, un isótopo menos común del hidrógeno.

Resumen/Enanas marrones

- En los últimos años se han descubierto cientos de enanas marrones. “Enana” significa que se trata de una estrella pequeña; “marrón” denota un objeto que no brilla por reacciones nucleares perdurables. En lo que se refiere a la masa y a otras propiedades, son un cruce entre las miniestrellas y los megaplanetas.
- Ahora hay que averiguar cuál es su origen. Las enanas marrones se gestan igual que las estrellas, pero algo interrumpe su crecimiento en la cuna. Según una teoría, el factor determinante es el tamaño diminuto de los fragmentos de nube de los que nacen, pequeñez debida a la turbulencia del gas. Según otra hipótesis, lo es la interacción gravitatoria con los embriones estelares cercanos.
- Los astrónomos están comprobando ambas hipótesis a través de la observación de las propiedades de las enanas marrones. La solución del enigma del origen de las enanas marrones tendrá importantes implicaciones en el conocimiento de la formación de estrellas y planetas. También dejará más clara la distinción entre estrella y planeta.

Las enanas marrones recién formadas brillan como las estrellas más débiles; consumen con rapidez su carga de deuterio y se enfrían como los planetas. Las leyes de la física dicen que el tamaño de las enanas marrones jóvenes (al igual que el de las estrellas) viene dado por el equilibrio entre la fuerza gravitatoria y el empuje hacia el exterior de la presión térmica del gas. Pero a una edad mayor, como si fueran planetas de masa muy elevada, alcanzan un equilibrio entre la gravedad y la presión cuántica ejercida por los electrones densamente empaquetados. Las atmósferas de las enanas marrones jóvenes se asemejan a las de las estrellas más pequeñas. Mas, a medida que se enfrían, presentan, cabe suponer, fenómenos meteorológicos característicos de los planetas: las nubes, el asentamiento del polvo y las precipitaciones.

Se han hallado cientos de estos peculiares especímenes, tanto jóvenes en regiones de formación estelar como de edad avanzada en la vecindad de nuestro sistema solar. Aunque la mayoría vagan libres por la galaxia (como las estrellas), algunos giran alrededor de estrellas (como los planetas). Por lo que parece, la cuantía de enanas marrones en nuestra galaxia se asemeja a la de estrellas de tipo solar. A medida que aumenta el interés de la ciencia por tales astros, se hace más imperiosa la cuestión sobre su formación. La respuesta resultará crucial para comprender los procesos que intervienen en la formación de las estrellas de baja masa y los planetas gigantes y conocer en qué se distinguen.

Orígenes nebulosos

En razón de su masa, las enanas marrones ocupan una posición intermedia entre los planetas y las estrellas. Su origen, en cambio, aparece misterioso. ¿Se forman a la manera de los planetas o de las estrellas? Los planetas se crean en los discos de gas y polvo que circundan las estrellas jóvenes. De acuerdo con el modelo más aceptado, los planetas gaseosos gigantes nacen de la progresiva aglomeración de residuos pulverulentos, que va creando un cuerpo cada vez mayor. Tras alcanzar una masa varias veces la terrestre, experimentan un crecimiento desbocado al barrer a un ritmo acelerado todo el gas que los rodea. El proceso se completa en unos pocos millones de años, al mismo tiempo que el disco de gas se disipa, bien porque se incorpore a la estrella central, bien porque sea expulsado del sistema. De esa manera la cantidad de gas disponible para construir planetas gigantes disminuye con el tiempo. La masa de los objetos más pesados se limita a unas 10 o 15 veces la de Júpiter. En tal caso, las enanas marrones no podrían formarse como los planetas. Las observaciones apoyan esta conclusión: la mayoría de las enanas marrones son cuerpos independientes, como las estrellas, y no objetos ligados a las estrellas, como los planetas.

Por esas razones, los astrónomos se inclinan por una formación de las enanas marrones parecida a la de las estrellas. Sin embargo, no parece tampoco que la teoría clásica de la génesis estelar resulte muy atinada en este caso. Docenas de años de observaciones han establecido que las estrellas se constituyen en el interior de nubes moleculares, inmensas aglomeraciones de gas frío y de polvo, cada una provista con material suficiente para crear

DON DIXON

Partos celestes

ESTRELLA

Una estrella toma forma al colapsar una región de una nube interestelar de gas y polvo. En el interior de esa región, una parte más densa se convierte en embrión estelar

100.000 años: el material circundante, atraído por el embrión, forma un disco

De 1 millón a 10 millones de años: la protoestrella gana peso y se contrae. El disco se hace más delgado y en su interior empiezan a crearse planetas

30 millones de años: la protoestrella se ha contraído hasta el punto en que se inicia la fusión de hidrógeno. Ya es una verdadera estrella

PLANETA

El planeta nace dentro del disco circunestelar cuando los granos se ensamblan y forman cuerpos mayores. Un planeta nunca llega a tener la masa suficiente para quemar hidrógeno. Se va apagando lentamente

ENANA MARRON

En un principio, la enana marrón sigue el mismo camino de una estrella

100.000 años: por alguna razón, deja de crecer

De 1 millón a 10 millones de años: no obstante, ha ganado la masa suficiente para iniciar la fusión del deuterio

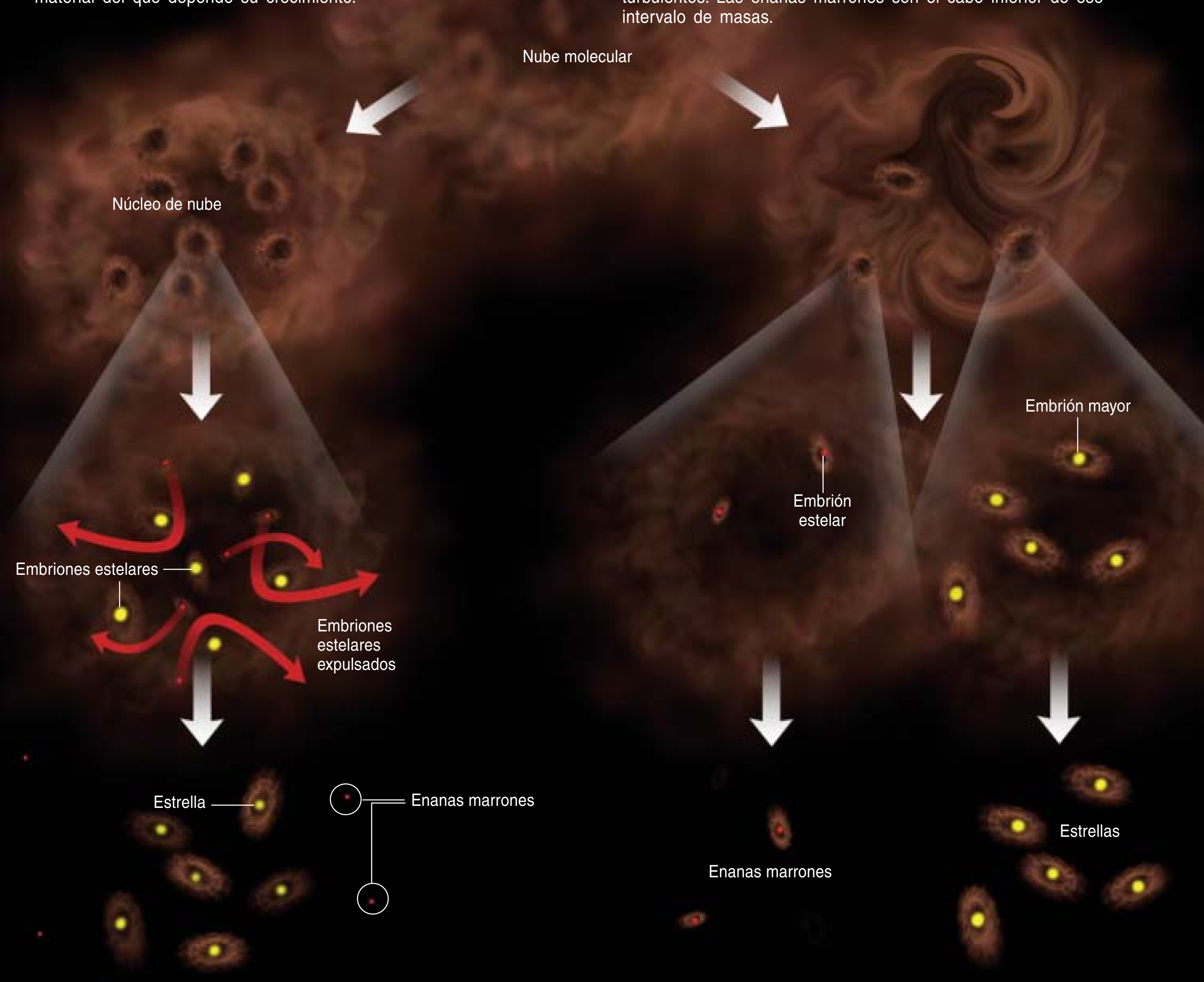
100 millones de años: agotado el deuterio, se parece a un planeta. No dejará ya de oscurecerse y enfriarse

Desarrollo truncado

Las enanas marrones, al igual que las estrellas, nacen de embriones estelares sumergidos en inmensas nubes de gas y polvo, pero algo impide que crezcan hasta alcanzar proporciones estelares. Sobre el particular hay dos teorías contrapuestas.

HIPOTESIS DE LA EXPULSION
Los embriones interactúan entre sí. Los más pequeños son expulsados de la nube; se les corta así el suministro de material del que depende su crecimiento.

HIPOTESIS DE LA TURBULENCIA
Las regiones densas de la nube (o "núcleos") que se convertirán en estrellas varían en tamaño debido a los movimientos turbulentos. Las enanas marrones son el cabo inferior de ese intervalo de masas.



DON DIXON

miles de soles. Dentro de las nubes hay regiones, los núcleos, más densas. Un núcleo denso y notable puede superar la fuerza expansiva de la presión del gas, para hundirse sobre sí mismo bajo su propio peso. La masa mínima que un núcleo debe tener para ello depende de diversas propiedades, entre ellas la temperatura; se la conoce por masa térmica de Jeans. Por los datos sobre las nubes moleculares, se calcula que el valor típico de la masa de Jeans se halla en torno a una masa solar.

El colapso de un núcleo no suele crear una sola estrella. Sus regiones centrales más densas se rompen en fragmentos. En 1976 C. Low y Donald Lynden-Bell, de la Universidad de Cambridge, calcularon que los fragmentos más pequeños podrían tener sólo varias masas jovianas. Simulaciones más recientes, de Alan Boss, de la Institución Carnegie en Washington, que toman en cuenta la presencia de campos magnéticos, indican que podría haber fragmentos de apenas una masa de Júpiter.

Loa fragmentos son embriones estelares, vale decir, estrellas en incubación, no objetos cuya gestación haya terminado. El gas del núcleo donde están sumergidos cae sobre ellos. Al final, los embriones barren la mayor parte del material y se convierten en estrellas de pleno derecho. Puesto que un núcleo con una masa gaseosa equivalente a la solar se rompe al colapsar en unos 10 embriones, debe esperarse que engendre un grupo de estrellas, dotada cada una de la décima parte de la masa solar, cuando menos.

¿Por qué hay, pues, enanas marrones con apenas unas decenas de masas jovianas, es decir, con sólo unas centésimas de la masa solar? Debe existir algo que impide a los embriones crecer hasta alcanzar proporciones estelares. Los debates actuales sobre la génesis de las enanas marrones se centran en el misterio de cómo y por qué el crecimiento de los embriones se suspende antes de haber reunido la masa suficiente para brillar como estrellas.

Los astrofísicos avanzaron algunos mecanismos. En el año 2001, Bo Reipurth, de la Universidad de Hawai en Hilo, y Cathie Clarke, de Cambridge, propusieron que las enanas marrones eran víctimas de la rivalidad entre hermanos. Los múltiples embriones de un núcleo compiten por atraer la materia circundante. El que crece más despacio está a merced de los demás. Las interacciones gravitatorias lo expulsan del núcleo, cortando su acceso a la reserva de gas. Ya no crecerá más. Si ocurre antes de que el embrión haya tenido tiempo de alcanzar una masa estelar, quedará convertido en una enana marrón. Las enanas marrones serían, pues, estrellas fallidas: no diferirían de las estrellas en su nacimiento, pero con su prematuro exilio se las habría destinado a permanecer pequeñas.

Al año siguiente, Paolo Padoan, de la Universidad de California en San Diego, y Åke Nordlund, de la Universidad de Copenhague, formularon una nueva hipótesis. Cuestionaron la suposición clásica de que la formación de estrellas comienza con núcleos que al menos contienen una masa solar o más. Argumentaron que los núcleos pueden ser menores que eso porque el movimiento turbulento dentro de la nube molecular desencadena el colapso gravitatorio.

Dicho de otro modo: un núcleo pequeño que no se contraería por sí solo colapsaría cuando la turbulencia lo comprimiese. Las enanas marrones nacerían directamente de los núcleos de menor masa. La turbulencia eliminaría así la necesidad de un mecanismo secundario (la expulsión) que impidiese el crecimiento de los embriones. Las enanas marrones no serían las perdedoras en una batalla por los recursos. Antes bien, habría carecido de recursos desde un principio.

Las dos hipótesis tienen consecuencias distintas. En la hipótesis de la turbulencia, la secuencia de eventos es la misma para estrellas y enanas marrones. Las estrellas proceden de núcleos mayores y las enanas marrones de núcleos con menor masa. El rango de las velocidades de turbulencia fija la proporción relativa entre los objetos grandes y los pequeños.

La hipótesis de la expulsión atribuye la creación de las enanas marrones a las interacciones dinámicas que pueden sacar a un embrión de su nube molecular. En la presencia o ausencia de este mecanismo adicional estriba la diferencia observacional entre las dos teorías. Según el modelo de la turbulencia, lo que vale para las estrellas de baja masa vale para las enanas marrones, mientras que la hipótesis de la expulsión predice la pérdida de algunas propiedades estelares cuando se expelen las enanas marrones.

Nacimiento de una estrella

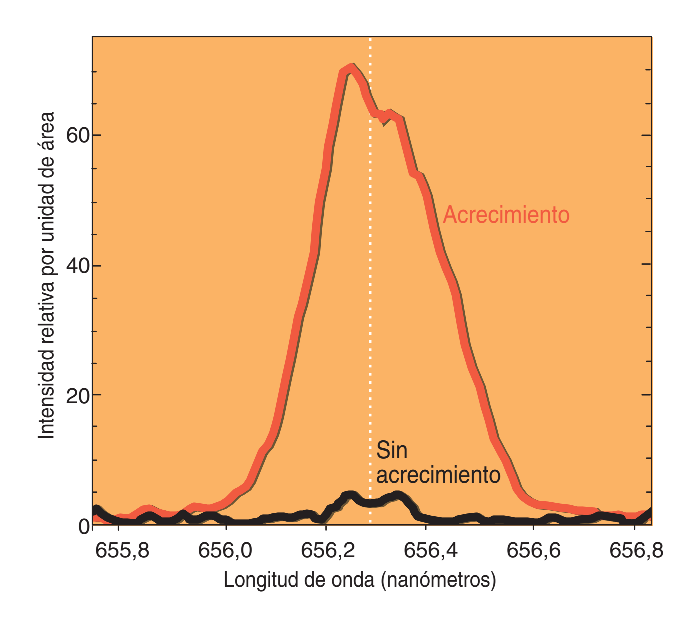
Las estrellas recién formadas se hallan rodeadas por discos de material residual. Transcurridos varios millones de años, la materia del disco se ha empleado en constituir la estrella naciente y en hacer planetas, lunas, asteroides y cometas, o se pierde sin remisión. Si la hipótesis de la turbulencia anduviera en lo cierto, las enanas marrones deberían también rodearse de discos, de planetas incluso. La hipótesis de la expulsión predice lo contrario. Si un embrión es expulsado del núcleo, se quedará sin buena parte de su disco, tal y como indican las simulaciones de Matthew Bate y sus colaboradores, de la Universidad de Exeter.

Además, las estrellas suelen aparecer en parejas. En el modelo turbulento, los sistemas binarios deberían evidenciarse entre las enanas marrones con la misma frecuencia que entre las estrellas. El proceso de expulsión, por el contrario, rompería la binariedad, exceptuando los sistemas muy ligados. Por tanto, las enanas marrones dobles con una separación grande entre ellas deberían ser escasas o inexistentes.

Estas propiedades facilitan la vía para contrastar las dos hipótesis. Por ejemplo, se pueden buscar los discos analizando la radiación infrarroja. Los granos de polvo de un disco absorben la luz de la estrella central o de la enana marrón y la reemiten a mayores longitudes de onda. Por ese motivo los cuerpos celestes con disco parecen más brillantes en el infrarrojo que si no lo tuviesen. En busca de ese exceso infrarrojo, nosotros y otros astrónomos hemos estudiado un número apreciable de enanas marrones inmaduras en regiones de formación estelar cercanas y en cúmulos (donde las edades de las estrellas se estiman a partir de los colores y brillos). Hemos visto que alrededor de las enanas marrones de pocos millones de años abundan los discos.

De las enanas investigadas, más de la mitad presentan indicios de un disco infrarrojo; esa fracción podría alcanzar el 80 por ciento entre los objetos más jóvenes: en un cúmulo joven de una edad determinada la proporción de enanas marrones con disco es comparable a la de estrellas con disco. En resumen, las enanas marrones están rodeadas por discos con la misma frecuencia que las estrellas, y la vida media de sus discos también es similar.

Los espectros infrarrojos no sólo confirman la existencia de los discos; también dejan estudiar la geometría y otras propiedades del sistema. Los discos que rodean las estrellas jóvenes presentan una amplia gama de formas. Algunos son más gruesos hacia el exterior que hacia el centro, como una lente cóncava. Otros parecen bastante planos, presumiblemente porque los granos de polvo han crecido demasiado para que los mueva el gas y se depositan en el plano medio del sistema. En muchos discos se han encontrado los rasgos espectrales de la emisión por silicatos, lo que apunta a que la radiación



2. LA LINEA ESPECTRAL DEL HIDROGENO revela si la enana marrón tiene disco de gas. Los átomos de hidrógeno en reposo emiten luz a ciertas longitudes de onda (*línea de puntos*), pero cuando el gas está en movimiento la luz se dispersa por un rango de longitudes de onda correspondiente al intervalo de velocidades dentro del gas. El gas de la superficie de la enana marrón, mucho más lento, crea una línea estrecha (*curva inferior*). El pico ancho (*curva superior*) prueba que el gas cae hacia la enana desde el disco. La mayoría de las enanas marrones jóvenes cuentan con discos, lo que induce a pensar en que nacieran igual que las típicas.

de la estrella ha calentado mucho los pequeños granos de polvo de la superficie del disco. Con los datos obtenidos por los telescopios terrestres de mayor diámetro y por el telescopio espacial Spitzer (el homólogo en infrarrojos al telescopio Hubble), varios equipos, incluido el nuestro, han comprobado que los discos de las enanas marrones manifiestan esas mismas propiedades.

Otro método para identificar discos consiste en detectar los signos que señalan que la materia fluye hacia el objeto central. La acreción se certifica a partir de los rasgos espectroscópicos que producen los diversos procesos que intervienen. Así, las líneas espectrales de emisión del hidrógeno revelan que cae gas de alta velocidad hacia el objeto central, desde el borde interior del disco y siguiendo las líneas del campo magnético. Las líneas de calcio ionizado y de helio excitado demuestran las altas temperaturas alcanzadas al chocar el gas contra la superficie estelar. Otras líneas espectrales atestiguan la presencia de chorros y vientos en expansión, producidos cuando los campos magnéticos del disco arrojan parte del material al exterior. Nuestro equipo, entre otros, ha observado estas propiedades en los espectros de muchas enanas marrones recién formadas (*véase la figura 2*). Atraen materia a un ritmo que es la décima o centésima parte de frecuencia advertida en las estrellas de masa solar; lo mantienen durante 10 millones de años.

¿Hay esperanza para la teoría de la expulsión?

Resumiendo, pues, las enanas marrones jóvenes tienen por lo común discos de estructura similar a los de las estrellas, cuyo gas engullen de la misma forma que las estrellas jóvenes y que perviven como los discos de éstas. Por ahora, todos los datos apuntan a que la infancia de las enanas marrones se parece mucho a la de las estrellas de tipo solar, lo que en principio apoya la hipótesis de la turbulencia. Pero el caso no está cerrado. La teoría de la expulsión predice unos discos de las enanas marrones muy mermados; ahora bien, no indican que no puedan conservar un disco pequeño.

Las observaciones actuales sólo estudian las regiones internas de los discos. Aunque revelan la presencia de tales estructuras alrededor de las enanas marrones, no proporcionan información sobre sus tamaños. No bastan, pues, para rechazar la hipótesis de la expulsión. El radiotelescopio terrestre Gran Red Milimétrica de Atacama (ALMA), ahora en construcción en Chile, deberá poder estudiar las regiones exteriores de los discos de las enanas marrones y medir sus tamaños y masas. Contrastará así las distintas hipótesis. Quizá predominen la turbulencia y la expulsión en diferentes regiones de la galaxia.

Las observaciones podrían también “cazar” a las enanas marrones en el mismo momento de su creación. El equipo de Neal Evans, de la Universidad de Texas en Austin, con la ayuda del telescopio espacial Spitzer, acaba de identificar lo que parecen ser núcleos aislados, con objetos muy débiles formándose en el interior. Si en un futuro se confirmara que se trata de enanas marrones, la hipótesis de la turbulencia recibiría un sólido respaldo.

La proporción de enanas marrones binarias separadas constituye otra prueba de los mecanismos de formación. Se han detectado varias. Si las futuras exploraciones encuentran muchos más sistemas débilmente ligados, socavarían la teoría de la expulsión, que los habría distanciado.

La teoría de la formación de las enanas marrones tiene ramificaciones importantes en la génesis estelar y planetaria en general. Si conociéramos cuál de los dos mecanismos propuestos predominara, tendríamos la respuesta a una de las cuestiones inveteradas de la astronomía: ¿qué determina el número relativo de estrellas de distintas masas? El modelo de la expulsión declara que las interacciones entre los embriones estelares; según el de la turbulencia, el intervalo de velocidades turbulentas dentro de la nube molecular.

De igual forma, el tamaño y la longevidad de los discos estelares, y por tanto la eficiencia de la formación planetaria, dependen en gran medida del papel que desempeñen las interacciones dinámicas dentro del núcleo donde se gestan las estrellas. Si menudean las interacciones, como sostiene la hipótesis de la expulsión, los sistemas planetarios deberían ser escasos. Pero si la turbulencia es el principal mecanismo que fija las masas estelares, los discos deberían ser grandes y de larga duración; sistemas planetarios como el nuestro constituirían estructuras harto comunes.

Paradójicamente, el estudio de la formación de las enanas marrones pone en duda la propia definición de tales objetos. La línea divisoria entre las enanas marrones y los planetas —12 veces la masa de Júpiter— es arbitraria; las teorías de formación no proporcionan ese límite.

En la hipótesis de la expulsión, los embriones estelares que germinan dentro de un núcleo de nube mo-

LUCY READING-IKKANDA

¿Planetas alrededor de enanas marrones?

El descubrimiento de discos de gas y polvo alrededor de un número considerable de enanas marrones suscita una cuestión interesante: ¿pueden tener planetas? ¿Podría un planeta girar alrededor de un cuerpo que él mismo apenas sea más que un planeta? Parece plausible una respuesta afirmativa. Gaël Chauvin y sus colaboradores, del Observatorio Europeo del Sur, han descubierto un objeto que quintuplica la masa de Júpiter y gira en órbita alrededor de una enana marrón joven, a una distancia de 40 unidades astronómicas. (Una unidad astronómica es la distancia media entre el Sol y la Tierra; 40 unidades viene a ser la distancia entre Plutón y el Sol.) Nuestras propias observaciones (*imagen de la derecha*) sugieren que esa compañera pudiera mejor tener 8 o 10 masas jovianas, lo que todavía cae por debajo del límite aceptado para una enana marrón. Es más, las observaciones apuntan a que esta compañera cuenta con un disco propio, que podría aportar el material para fabricar satélites.



La enana de una enana. La imagen infrarroja presenta una enana marrón (*objeto central*) en cuyo entorno gira un cuerpo todavía menor (*flecha*).

Hasta hace poco, las búsquedas de planetas no consideraban la exploración de las estrellas de baja masa, y menos aún de enanas marrones. En parte se debía a un sesgo geocéntrico: creíase que, para encontrar un sistema similar al nuestro, había que examinar estrellas de tipo solar. Pero otra buena razón era que las estrellas de baja masa son más débiles y más difíciles de observar con la precisión necesaria para detectar planetas. De los más de 150 planetas gigantes conocidos, sólo unos pocos giran alrededor de estrellas de masa menor que la solar, y aun esas estrellas son unas cuantas veces más pesadas que la mayor enana marrón.

Los astrónomos se proponen explicar la existencia de la compañera hallada por Chauvin y sus colaboradores. Los discos de las estrellas de baja masa son más ligeros que los de las estrellas más pesadas. Los discos de las enanas marrones que se han medido hasta ahora contienen sólo unas pocas masas jovianas de gas y polvo. Gregory Laughlin y Peter Bodenheimer, de la Universidad de California en Santa Cruz, y Fred Adams, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, aducen que en un sistema tan tenue se necesita más tiempo para la formación de un planeta; el disco se disipará antes de que el planeta alcance un tamaño importante. En consecuencia, la compañera vista por Chauvin probablemente no se gestó en el disco de la enana marrón. Parece más verosímil que el compañero se formase como una enana —a partir del colapso de una nube—, de suerte tal, que la pareja constituyera un sistema estelar binario en miniatura.

No obstante, estas restricciones del crecimiento se aplican sólo a los planetas gigantes. No hay ninguna razón por la que, en los discos de las enanas marrones, no puedan formarse asteroides, cometas e incluso planetas de masa terrestre. El telescopio espacial Spitzer ha encontrado signos de crecimiento y procesado químico de los granos de polvo en algunos discos de enanas marrones; quizá sean los primeros pasos de la creación de planetas. Deberían buscarse los surcos que los cuerpos planetarios abren en el disco. O cabría observar continuadamente la luz emitida por la enana para ver si presenta oscurecimientos periódicos, prueba de que un planeta ha pasado por delante y ha bloqueado parte de su luz.

Si existen, los planetas de las enanas marrones giran en torno a un "sol" que no es un sol en absoluto. ¿Qué vida podría haber en esos planetas? Puesto que una enana marrón es bastante más fría que nuestro Sol, la zona habitable sería muy pequeña y estaría muy próxima a la enana. Y se estrecha aún más a medida que la enana marrón se enfría.

lecular pueden tener tan poca masa como Júpiter. Si se los expulsa rápidamente, se tendrá un objeto de masa planetaria.

En el modelo de la turbulencia, los movimientos caóticos del gas pueden desencadenar el colapso de objetos que caen debajo de la definición "tradicional" de enana marrón. Las observaciones recientes apuntan a la existencia de enanas marrones aisladas cuyas masas son sólo unas pocas veces la joviana. De confirmarse, de nuevo rechinaría la noción misma de planeta. Parece que por instinto preferimos fronteras bien definidas y categorías nítidas para nuestra percepción del cosmos, pero la naturaleza sabe más y nos muestra un continuo de objetos con solapamientos de todo tipo.

Como ocurre con frecuencia en la ciencia, los descubrimientos se hacen en la frontera, donde unos fenómenos se confunden con otros y las propiedades más esenciales se manifiestan con mayor claridad. Ha habido que descubrir las enanas marrones —predichas pasado el ecuador del siglo pasado pero halladas hace apenas 10 años— para que los astrónomos estelares comprendieran qué es de verdad una estrella. Aunque hemos comenzado a descifrar su infancia, el estudio de estos cuerpos liliputienses sigue aún en mantillas. El conocimiento de la gestación de las enanas marrones promete enseñarnos mucho acerca del origen de estrellas y planetas.

SUBHANJOY MOHANTY, RAY JAYAWARDHANA Y NURIA HUELAMO

Los autores

Subhanjoy Mohanty y **Ray Jayawardhana** han observado con los telescopios Keck, Subaru y Gran Telescopio y el Magallanes las estrellas de muy baja masa y enanas marrones. Mohanty se halla adscrito al Centro de Astrofísica de Harvard. Jayawardhana enseña astronomía y astrofísica en la Universidad de Toronto.

Bibliografía complementaria

STAR FACTORIES: THE BIRTH OF STARS AND PLANETS. Ray Jayawardhana. Steck-Vaughn (Harcourt), 2000.

THEORY OF LOW-MASS STARS AND SUBSTELLAR OBJECTS. Gilles Chabrier e Isabelle Baraffe en *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 38, págs. 337-377; 2000.

UNRAVELING BROWN DWARF ORIGINS. Ray Jayawardhana en *Science*, vol. 303, págs. 322-323; 16 enero, 2004.

THE MYSTERIOUS ORIGIN OF BROWN DWARFS. Paolo Padoan y Åke Nordlund en *Astrophysical Journal*, vol. 617, n.º 1, parte 1, págs. 559-564; 10 de diciembre, 2004.

THE T TAURI PHASE DOWN TO NEARLY PLANETARY MASSES. Subhanjoy Mohanty, Ray Jayawardhana y Gibor Basri en *Astrophysical Journal*, vol. 626, n.º 1, parte 1, págs. 498-522; 10 de junio, 2005.


0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0
1.0
0.8
0.7
0.6
0.5
0.2
0.1
0.2
0 0.2 0.4 0.6 0.8
Fig. 107.
Fig. 70.

El genoma personalizado

Así que pasen menos de diez años, contaremos con nuevas técnicas de secuenciación, más rápidas y baratas, que facilitarán el acceso a la información génica

George M. Church



STUART BRADFORD

Cuando en 1993 se tendió la Telaraña Mundial (la *World Wide Web*) quedaba claro que iba a echar raíces. No es lo que suele ocurrir con la mayoría de las nuevas técnicas, que tardan diez años, por lo menos, en pasar de un primer ensayo de tanteo a su aceptación. Tampoco hubiera acontecido entonces si no se dispusiera ya de una infraestructura, incluida la construcción de la Red entre 1965 y 1993. Además se contaba con la constatación de que los ordenadores personales y otros recursos habían traspasado el umbral crítico.

No hemos de olvidar que la imaginación y las fuerzas del mercado impulsan el desarrollo y la expansión de las nuevas técnicas. El programa espacial estadounidense, por ejemplo, comenzó como un sueño del gobierno; sólo mucho después el uso militar y civil de los satélites empujó a la industria hacia la viabilidad comercial. La próxima revolución técnica quizás ocurra en el campo de la biotecnología. ¿Cuáles serán los mercados, descubrimientos e inventos que le darán forma? ¿Qué umbrales críticos en infraestructura y recursos la harán posible?

Entre 1984 y 1985, me hallaba encuadrado en el grupo de expertos que manifestó la conveniencia de un Proyecto Genoma Humano (PGH) para la "lectura" del libro de instrucciones que, contenido en el ADN, dirige la construcción y la conservación del ser humano. De acuerdo con nuestro propósito, se trataba de obtener la secuencia completa del genoma humano por 3000 millones de dólares, entre 1990 y 2005.

Unos cuantos años antes de agotar el plazo, habíamos secuenciado el 93 por ciento del genoma. Había ido creando un cuerpo valioso de técnicas y métodos. El refinamiento incesante de tales herramientas logró rebajar el precio de la secuenciación de un genoma humano a unos 20 millones de dólares. Pese a este abaratamiento, la secuenciación genómica a gran escala sigue reservada a un número selecto de centros dedicados a la secuenciación y grandes proyectos de investigación.

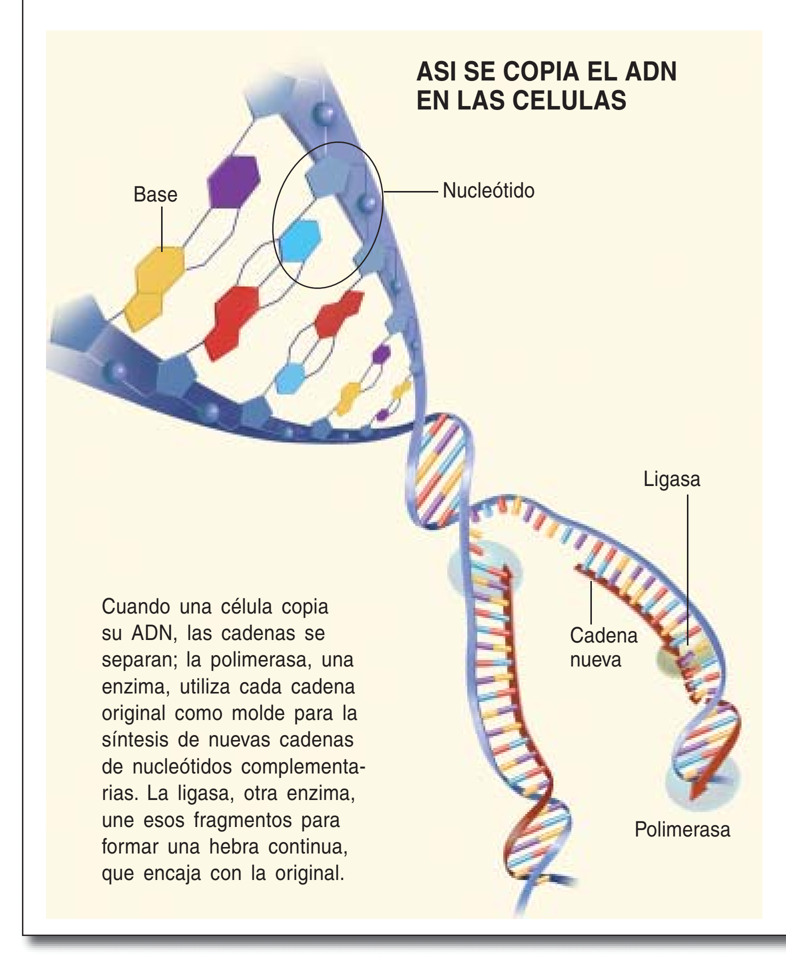
Pero se intenta reducir el coste hasta los mil dólares, un precio asequible incluso para un particular que deseara poseer su secuencia genómica personal completa en un disco, una buena herramienta de consulta para los médicos. Tamaño recorte de costes potenciará la utilidad de los datos génicos obtenidos, al multiplicarse el número de expertos con acceso a la investigación genómica y el número de genomas que podrán compararse para estudiar variaciones entre individuos, entre sanos y afectados por alguna enfermedad.

La genómica "humana" se extiende más allá de los propios humanos. Incluye patógenos, alérgenos y microorganismos beneficiosos presentes en nuestra ingesta y en nuestro organismo. Lo mismo que hoy estamos pendientes de los mapas del tiempo, quizá llegue el día en que podamos consultar mapas diarios de distribución de patógenos y alérgenos. Asimismo, la nanotecnia y la biotecnología, campos en rápida expansión, podrían acelerar su explotación de hábitats para la obtención de nuevos materiales "inteligentes" y microorganismos que puedan domesticarse para la producción o para la descontaminación.

Con todo, estas aplicaciones, y otras que ni siquiera imaginamos todavía, se detienen ante una misma barrera: el coste. Dos programas sobre "Técnicas revolucionarias de secuenciación del genoma", financiados por el estadounidense Instituto Nacional de la Salud, se proponen desarrollar para 2009 una técnica que secuencie un genoma humano por 100.000 dólares; para 2014, este coste debería rebajarse a 1000 dólares. Otra opción consistiría en ofrecer una recompensa económica para el primer grupo que alcance este logro técnico. Nos vamos aproximando a la meta. Los métodos de secuenciación en desarrollo quizá reduzcan a 20.000 dólares el precio de la lectura de un genoma, de aquí a cuatro años.

SECUENCIACION DEL ADN

Muchas técnicas de secuenciación genómica sacan provecho de la regla de complementariedad que rige el emparejamiento entre bases del ADN. El alfabeto del genoma consta de sólo cuatro letras o unidades elementales, las bases: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T). Se emparejan entre sí (A con T, C con G) para formar los peldaños de la escalera de ADN. El mensaje codificado en la secuencia de bases a lo largo del ADN está escrito por duplicado, pues la identificación de una base en una cadena revela la identidad de su complementaria en la otra cadena. Las células se sirven de esa regla para copiar y reparar su propio ADN (*debajo*); se aprovecha también para copiar (*1-2*) y marcar el ADN de interés en técnicas de secuenciación como la que Frederick Sanger desarrolló en los años setenta del siglo pasado (*3-4*), que constituye todavía la plantilla de secuenciación habitual.



Cuando una célula copia su ADN, las cadenas se separan; la polimerasa, una enzima, utiliza cada cadena original como molde para la síntesis de nuevas cadenas de nucleótidos complementarias. La ligasa, otra enzima, une esos fragmentos para formar una hebra continua, que encaja con la original.

Resumen/Revolución genómica

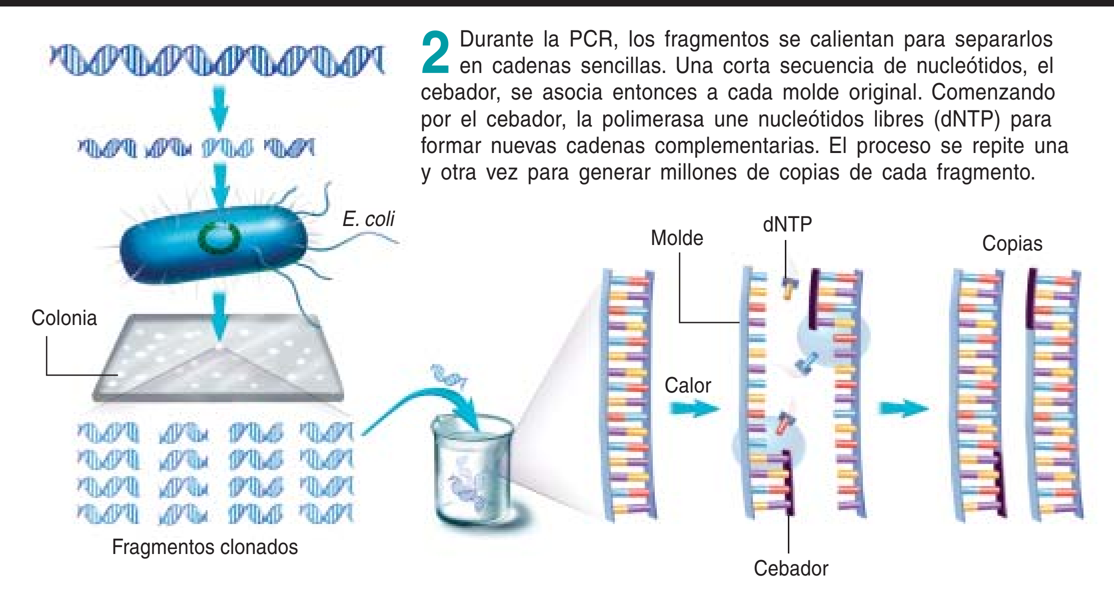
- El potencial de la biotecnología se explotará en plenitud cuando las técnicas de secuenciación genómica y otros de sus instrumentos se manejen como un ordenador personal y valgan lo que éste cuesta.
- Los nuevos métodos para leer el ADN rebajan costes en varios capítulos: supresión de pasos preparativos, miniaturización de los equipos y secuenciación simultánea de millones de moléculas.
- El desarrollo de la secuenciación a bajo coste plantea nuevos interrogantes sobre cómo y quién debería utilizar la información genética personal. El Proyecto Genoma Personalizado se ocupa de tales cuestiones.

Lectura del ADN

El tamaño, la estructura y la función del ADN constituyen parámetros críticos para cualquier método de secuenciación. El genoma humano consta de 3000 millones de

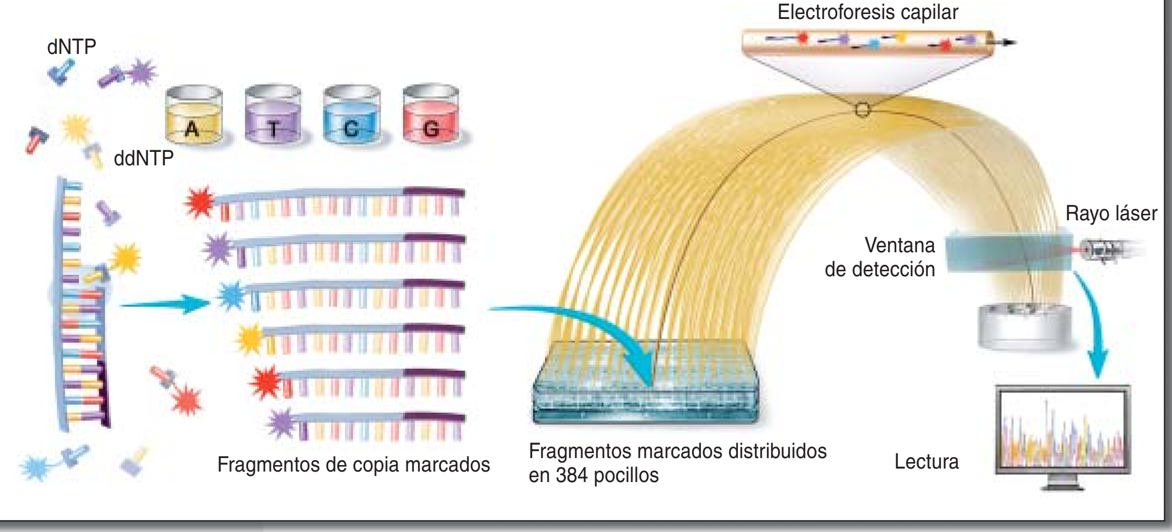
1 Antes de secuenciar con el método Sanger, una cadena original de ADN se rompe en fragmentos de menor tamaño. Este material se clona en el interior de colonias de la bacteria *Escherichia coli*. Una vez extraídos de las bacterias, los fragmentos de ADN se someten a otra ronda masiva de copiado, o amplificación, mediante un proceso de reacción en cadena de la polimerasa (PCR).

2 Durante la PCR, los fragmentos se calientan para separarlos en cadenas sencillas. Una corta secuencia de nucleótidos, el cebador, se asocia entonces a cada molde original. Comenzando por el cebador, la polimerasa une nucleótidos libres (dNTP) para formar nuevas cadenas complementarias. El proceso se repite una y otra vez para generar millones de copias de cada fragmento.



3 Se marcan luego fragmentos de cadena simple en un proceso similar a la PCR, pero con nucleótidos terminadores marcados mediante fluorescencia (ddNTP), que se añaden a la mezcla de cebadores, polimerasa y dNTP. Las cadenas complementarias se van alargando hasta que, por azar, se incorpora un ddNTP. Se detiene la síntesis. Los fragmentos de copia resultantes tienen longitud variable y un nucleótido marcado en un extremo.

4 La electroforesis capilar separa los fragmentos, dotados de carga negativa, atrayéndolos hacia un polo de carga positiva. Los de menor longitud se mueven con mayor celeridad: su orden de llegada refleja, pues, su tamaño. Los ddNTP terminadores se "leen" como la secuencia de bases del molde. Un láser activa los marcadores fluorescentes conforme los fragmentos atraviesan una ventana de detección; ello produce una lectura de color que se traduce a una secuencia.



TERESE WINSLOW

pares de nucleótidos. Cada uno de éstos contiene una de las cuatro bases (en forma abreviada A, C, G y T) del alfabeto genómico que codifica la información almacenada en el ADN. Estas se emparejan según reglas estrictas para formar los peldaños que constituyen la estructura en escalera del ADN. Debido a estas normas de emparejamiento, la lectura de la secuencia de bases a lo largo de un lado de la escalera revela, a su vez, la secuencia, complementaria, del otro.

Este genoma de tres mil millones de bases se distribuye en 23 cromosomas. Cada persona suele poseer dos copias completas (una de cada progenitor), que difieren en un 0,01 por ciento: el genoma de un individuo contiene, por tanto, seis mil millones de pares de bases. La secuenciación de un tramo del genoma requiere de un sensor que detecte las diferencias subnanométricas entre las cuatro bases. La microscopía túnel de barrido permite representar, mediante un proceso físico, estas minúsculas estructuras así como sus sutiles diferencias. No obstante, para la lectura de millones o miles de millones de bases, la mayoría de las técnicas de secuenciación se fundan en procesos químicos.

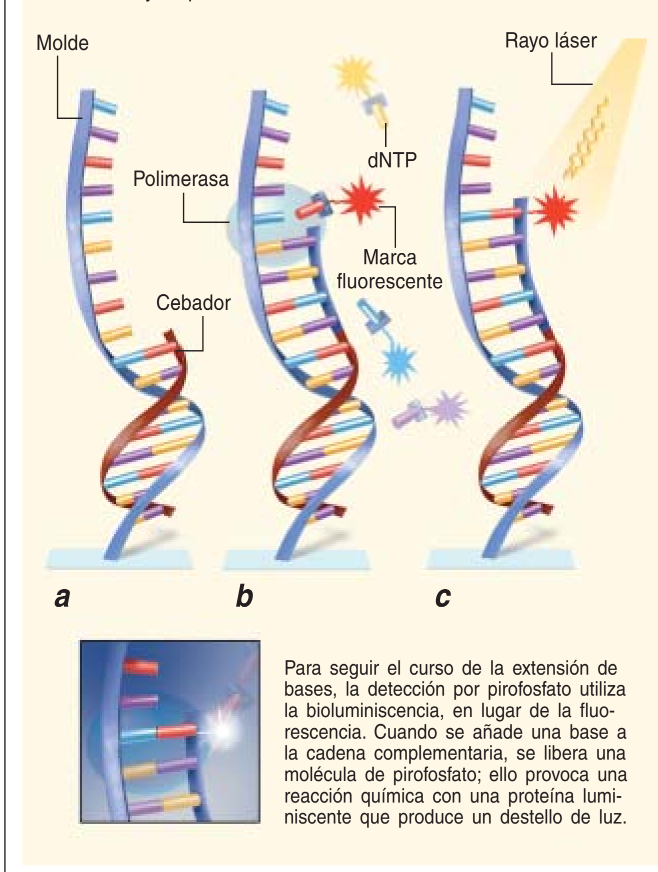
En los años setenta del siglo pasado, Frederick Sanger desarrolló un método que se convirtió en la herramienta de trabajo del PGH. Y sigue constituyendo la base de la mayor parte de la secuenciación que se lleva a cabo. Esta

SECUENCIACION POR SINTESIS

En su mayoría, los métodos de secuenciación genómica se sirven de los mecanismos naturales de síntesis de ADN para identificar las bases en una cadena de ADN. En función del proceso remedado, se distinguen dos métodos: el de "extensión de bases" y el de "ligación" (*abajo*). Ambos dependen de ciclos repetidos de reacciones químicas. Sin embargo, nuevas técnicas reducen los costes e incrementan la velocidad de la secuenciación mediante la miniaturización del instrumental (que reduce las cantidades de reactivos químicos usados) y la lectura simultánea de millones de fragmentos de ADN (*página opuesta*).

EXTENSION DE BASES

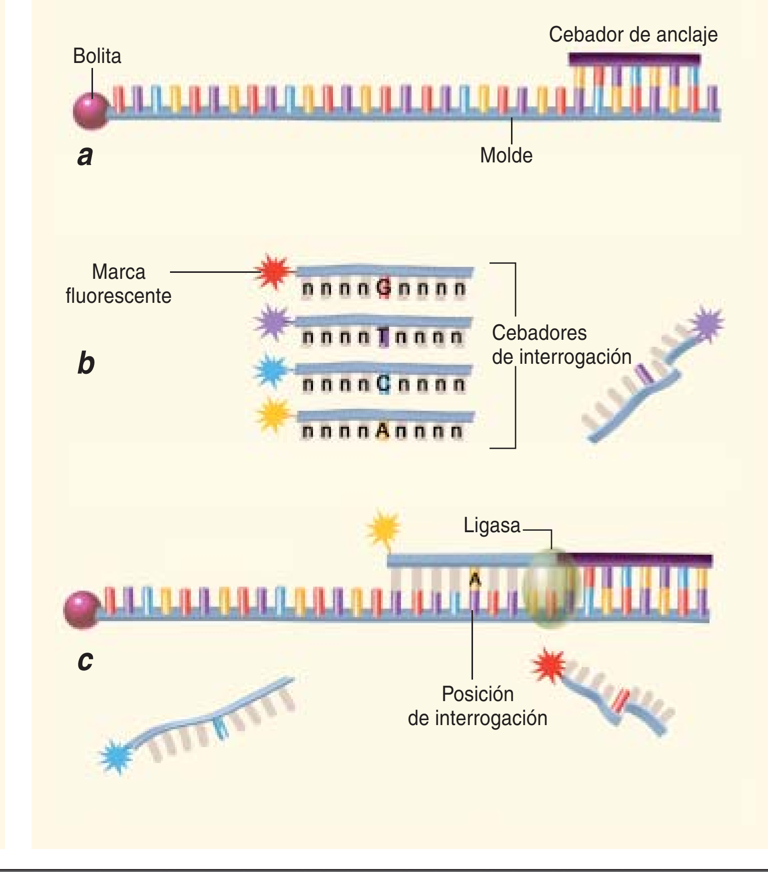
Un fragmento de ADN de cadena simple, el molde, se ancla a una superficie, con el punto de inicio de una cadena complementaria, el cebador, unido a uno de sus extremos (*a*). Cuando los nucleótidos marcados mediante fluorescencia (dNTP) y la polimerasa se exponen al molde, se añade a la cadena del cebador una base complementaria marcada (*b*). El resto de las moléculas de polimerasa y dNTP se eliminan. Luego, mediante láser, se excita el marcador fluorescente, revelándose así la identidad del nucleótido recién incorporado (*c*). Por fin, el marcaje fluorescente se elimina y el proceso comienza de nuevo.



Para seguir el curso de la extensión de bases, la detección por pirofosfato utiliza la bioluminiscencia, en lugar de la fluorescencia. Cuando se añade una base a la cadena complementaria, se libera una molécula de pirofosfato; ello provoca una reacción química con una proteína luminiscente que produce un destello de luz.

LIGACION

Para señalar el principio de una secuencia desconocida, un "cebador de anclaje" se une a un molde de cadena simple (*a*). Con ADN degradado se fabrican cortos "cebadores de interrogación", marcados con fluorescencia; éstos conservan un nucleótido en la posición de interrogación, que porta una de las cuatro bases (*b*). La ligasa une uno de los cebadores de interrogación al cebador de anclaje, según las reglas de complementariedad de bases, para emparejar la base de la posición de interrogación con la cadena molde (*c*). El complejo "cebador de anclaje-interrogación" se elimina entonces; el proceso se repite para otra posición distinta en el molde.



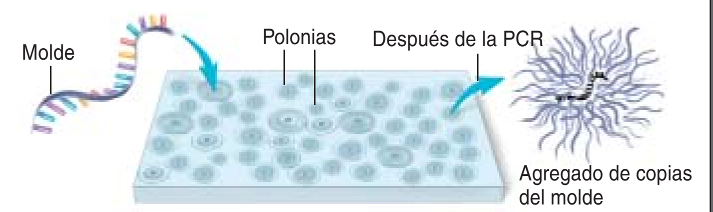
técnica de secuenciación mediante separación requiere varias rondas de duplicación para obtener copias múltiples del segmento genómico de interés. La ronda final produce copias de longitud distinta, cada una con una base marcada por fluorescencia en el extremo. Estas se separan en función del tamaño mediante electroforesis. La lectura, mediante un visor, del marcaje fluorescente revela, por fin, la secuencia de bases de la cadena original.

El método Sanger ofrece fiabilidad y precisión. Sin embargo, aun con las mejoras incorporadas durante estos años, sigue siendo lento y caro. Por ello, la mayoría de las otras técnicas de secuenciación buscan incrementar la velocidad y reducir los costes mediante la supresión de los lentos pasos preparativos, la miniaturización de los componentes (para reducir las cantidades de los reactivos químicos empleados) y la ejecución, en masa y en paralelo, de las reacciones, que permite secuenciar simultáneamente millones de fragmentos.

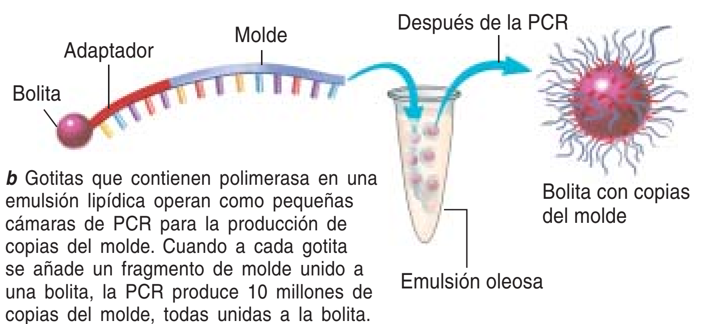
Varios grupos de investigación aplican métodos de secuenciación por síntesis. Tales secuenciaciones enzimáticas se fundan en los procesos de "alta fidelidad" que las células desarrollan para copiar y reparar su propio genoma. Cuando una célula se prepara para dividirse,

AMPLIFICACION

Dada la dificultad de detectar una señal luminosa procedente de una sola molécula de ADN, la extensión de bases o la ligación suelen aplicarse, de forma simultánea, a millones de copias de la misma cadena molde. Los métodos que no requieren el uso de células (*a* y *b*) para la obtención de estas copias, recurren a la PCR a una escala miniaturizada.



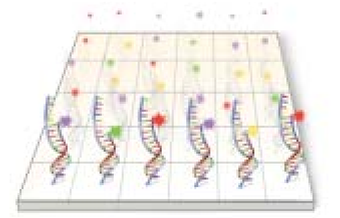
a Las polonias (colonias de polimerasa) creadas directamente sobre la superficie de un portaobjetos o gel contienen un cebador con el que un fragmento molde entra en contacto y se une. En el interior de cada polonia, la PCR produce un agregado que contiene millones de copias del molde.



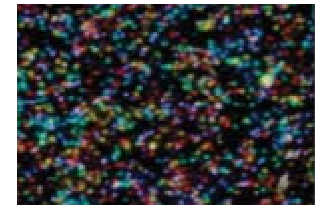
b Gotitas que contienen polimerasa en una emulsión lipídica operan como pequeñas cámaras de PCR para la producción de copias del molde. Cuando a cada gotita se añade un fragmento de molde unido a una bolita, la PCR produce 10 millones de copias del molde, todas unidas a la bolita.

LECTURA SIMULTANEA

La secuenciación en paralelo de miles o millones de fragmentos del molde maximiza la velocidad del proceso. Un sistema de extensión de bases con moléculas individuales usando la detección de señal fluorescente, por ejemplo, coloca cientos de millones de fragmentos de molde distintos en batería (*debajo a la izquierda*). Otro método inmoviliza millones de bolitas portadoras de copias del molde sobre la superficie de un gel para la secuenciación simultánea mediante ligación con señales fluorescentes (*debajo a la derecha*, imagen correspondiente al 0,01 % de la superficie total del portaobjetos).



Batería de moléculas individuales



Bolitas portadoras de copias del molde

FOTOGRAFIA DE JAY SHENDURE ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 309; 9 DE SEPTIEMBRE DE 2005. CON PERMISO DE AAAS

su escalera de ADN se separa en dos cadenas simples; entonces, una enzima, la polimerasa, se desplaza a lo largo de cada cadena y la toma por molde para catalizar, de acuerdo con las reglas del emparejamiento de bases, la concatenación de nucleótidos que da lugar a las hebras de secuencia complementaria. La ligasa, otra enzima, une entonces esas piezas para construir cadenas complementarias completas, al tiempo que las empareja con su molde original.

Los métodos de secuenciación por síntesis remedan partes de este proceso en la hebra de ADN de interés. Conforme la polimerasa añade las bases al punto de inicio de una nueva cadena complementaria, el cebador, o la ligasa reconoce una base complementaria, se revela la secuencia del molde.

Aunque varía la forma en que se detectan estos procesos, suele intervenir uno de dos tipos de señales luminosas. Si una molécula fluorescente se une a las bases añadidas, la señal de color que emite se observa mediante microscopía óptica. La detección de fluorescencia se emplea en ambos procesos de secuenciación, el fundado en la extensión de bases y el que se apoya en la unión (“ligación”). Con el método de detección por fluorescencia trabajan, entre otros, el grupo de Mertzker de la Universidad de Baylor, Robi Mitra, de la Universidad de Washington en St. Louis, el del autor, de la facultad de medicina de Harvard y de la compañía Agencourt Bioscience.

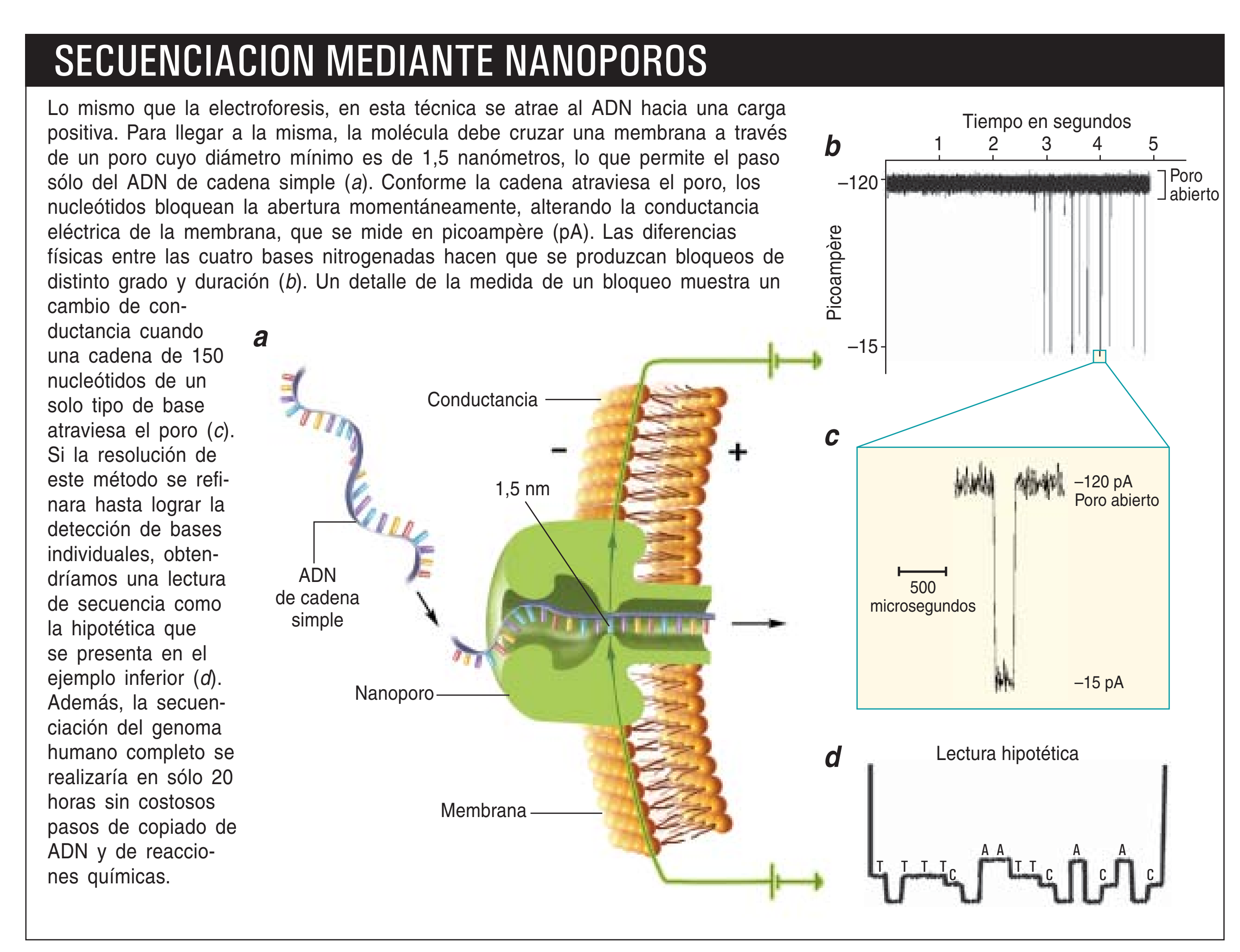
Otro método se sirve de la luciferasa, la enzima de las luciérnagas, y otras proteínas bioluminiscentes para detectar el pirofosfato que se libera cuando una base se une al cebador. Este sistema, desarrollado por Mostafa Ronaghi, ahora en la Universidad de Stanford, se emplea en los laboratorios de Pyrosequencing/Biotage y 454 Life Sciences.

Ambas formas de detección requieren que se produzcan al mismo tiempo múltiples emparejamientos; sólo así se logra una señal visible. Por ello deben ensayarse de forma simultánea numerosas copias de la secuencia de interés. Sin embargo, se están desarrollando métodos para detectar señales fluorescentes emitidas por una sola cadena molde. Stephen Quake, del Instituto de Tecnología de California, y expertos de Helicos Biosciences and Nanofluidics apuestan por el enfoque de la molécula única. Con la eliminación de la necesidad de obtener copias de la cadena molde para secuenciarlas, se proponen ahorrar tiempo y dinero.

La detección de moléculas fluorescentes individuales constituye todavía un reto de extrema dificultad. Dado que se pierden alrededor del 5 por ciento, debe realizarse un mayor número de “lecturas” para rellenar los huecos resultantes. Así pues, antes de empezar la secuenciación, se fabrican múltiples copias del molde del ADN de interés; para ello, éste se somete primero a una clonación en colonias de *Escherichia coli* y luego a una amplificación mediante la reacción en cadena de la polimerasa (PCR). También para esta etapa del proceso han surgido varios métodos que hacen innecesario el uso de bacterias para la obtención de copias del ADN.

Eric Kawashima, del Instituto de Investigación Farmacéutica Serono en Ginebra, Alexander Chetverin, de la Academia Rusa de Ciencias, y Mitra, entonces en Harvard, desarrollaron un método de amplificación que no requiere el uso de células. Se basa en la obtención de colonias individuales de polimerasa, o “polonias”, dispuestas libremente sobre la superficie de un portaobjetos o una capa de gel. En el interior de cada polonia, se somete una molécula molde a la acción de la PCR. Se cosechan así millones de copias, que crecen desde el molde central, a la manera de una colonia bacteriana. Cada agregado de copias del molde resultante mide una micra de ancho y ocupa un volumen de un femtolitro; caben miles de millones en un solo portaobjetos.

SECUENCIACION MEDIANTE NANOPOROS



Lo mismo que la electroforesis, en esta técnica se atrae al ADN hacia una carga positiva. Para llegar a la misma, la molécula debe cruzar una membrana a través de un poro cuyo diámetro mínimo es de 1,5 nanómetros, lo que permite el paso sólo del ADN de cadena simple (*a*). Conforme la cadena atraviesa el poro, los nucleótidos bloquean la abertura momentáneamente, alterando la conductancia eléctrica de la membrana, que se mide en picoampère (pA). Las diferencias físicas entre las cuatro bases nitrogenadas hacen que se produzcan bloqueos de distinto grado y duración (*b*). Un detalle de la medida de un bloqueo muestra un cambio de conductancia cuando una cadena de 150 nucleótidos de un solo tipo de base atraviesa el poro (*c*). Si la resolución de este método se refinara hasta lograr la detección de bases individuales, obtendríamos una lectura de secuencia como la hipotética que se presenta en el ejemplo inferior (*d*). Además, la secuenciación del genoma humano completo se realizaría en sólo 20 horas sin costosos pasos de copiado de ADN y de reacciones químicas.

En una variante de este método se producen primero polonias sobre minúsculas bolitas en el interior de gotas de una emulsión. Después de la reacción, millones de esas esferas, cada una portadora de copias de un molde distinto, se colocan en pocillos individuales o se inmovilizan mediante un gel, donde la secuenciación se lleva a cabo de forma simultánea en todas ellas.

Estos métodos de amplificación de molde y secuenciación mediante extensión de bases o ligación constituyen botones de muestra de las técnicas de secuenciación por síntesis que se aplican en los laboratorios.

Otra técnica, la secuenciación por hibridización, se sirve también de la fluorescencia para generar una señal visible. Lo mismo que la secuenciación por ligación, aprovecha la tendencia de las hebras de ADN a unirse, o hibridizar, con sus secuencias complementarias. Empleada por Affymetrix, Perlegen Sciences e Illumina, se utiliza ya de forma generalizada, sobre todo para buscar variaciones en secuencias genómicas conocidas. Requiere la síntesis de cadenas simples de ADN cortas en todas las combinaciones posibles de secuencias de bases. Se colocan luego en un portaobjetos. Cuando las copias de la cadena molde, cuya secuencia se desconoce, se arrastran sobre esta preparación, se unen a sus secuencias complementarias. El mejor emparejamiento produce la señal de fluorescencia más brillante. Illumina añade un paso de extensión de bases a este test de especificidad de hibridización.

Por último, la secuenciación por nanoporos. Se basa ésta en las diferencias físicas entre las cuatro bases nucleotídicas. Cuando una cadena simple de ADN pasa a través de un poro de 1,5 nanómetros, provoca fluctuaciones en la conductancia eléctrica del mismo. Cada base produce un cambio de conductancia distinto, que se utiliza para identificarla. Este método, ideado por Dan Branton, de Harvard, Dave Deamer, de la Universidad de California en Santa Cruz, y el autor, se está desarrollando en Agilent Technologies junto con otras variantes, como la detección de señal fluorescente.

Reducción de costes

La comparación de estos métodos de secuenciación de próxima generación, entre sí y con el de Sanger, pone sobre el tapete algunos de los factores que condicionarán su utilidad. Cotejemos dos de los proyectos de secuenciación genómica que se han llevado a cabo en fecha reciente: uno en 454 Life Sciences y otro en nuestro laboratorio de Harvard.

Nuestro equipo aplicó un sistema de secuenciación por ligación que usaba la amplificación del ADN molde en bolitas con polonias y un microscopio digital estándar para la lectura de las señales fluorescentes. El grupo de 454 usó para la amplificación un método similar

de PCR mediante emulsión de aceite, al cual siguió una secuenciación mediante extensión de bases con detección de pirofosfato en pocillos. En ambos casos se leyó la misma cantidad de secuencia: unos 30 millones de pares de bases en cada sesión de secuenciación. Nuestro sistema leyó unos 400 pares de bases por segundo; el de 454, 1700 por segundo. Para aumentar la exactitud del resultado se requieren múltiples sesiones de secuenciación. Con una cobertura de 43 veces (43x, es decir, 43 sesiones por base) del genoma en estudio, 454 consiguió una exactitud de un error por cada 2500 pares de bases. En Harvard logramos menos de un error por cada tres millones de pares de bases con una cobertura de 7×.

Para manipular los moldes, ambos grupos usamos bolitas de captura, cuyo tamaño afecta a la cantidad de reactivos consumidos. Nuestras esferas tenían una micra de diámetro; los de 454 usaron bolitas de 28 micras en pocillos de 75 picolitros.

El mejor método de secuenciación por electroforesis ofrece un rendimiento de 150 pares de bases por dólar. En Harvard hemos alcanzado un rendimiento de 1400 pa-

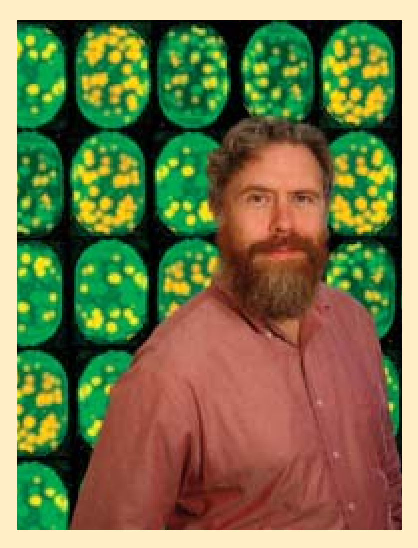
EL PROYECTO GENOMA PERSONALIZADO

Todos los niños que nacen en los EE.UU., antes de dejar el hospital, se someten a una prueba de fenilcetonuria, una enfermedad genética. A pacientes con cáncer de pulmón se les analiza el gen *EGFR* para estimar su respuesta al fármaco Iressa. Los tests genéticos que indican cómo metabolizará un individuo otras medicinas se aplican con frecuencia creciente para determinar la dosis idónea a administrar. Con el desarrollo de la secuenciación genómica de bajo coste nacerá la medicina personalizada. Se vislumbra ya el comienzo de esta nueva era. La demanda va en aumento.

Más allá de velar por nuestra salud, nos interesa también conocer nuestra genealogía, así como sacar a la luz las interacciones entre genes y de éstos con el ambiente que dan forma a nuestra cara, nuestro cuerpo y nuestro carácter. Miles de millones de datos correspondientes al genoma y el fenoma de individuos arrojarán luz sobre algunas de estas complejas relaciones. Se llama fenoma al conjunto de rasgos que ponen de manifiesto las instrucciones codificadas en el genoma.

Sin embargo, la perspectiva de que este nuevo tipo de información personal se halle de pronto ampliamente disponible despierta preocupación. Las compañías de seguros, empresas, tribunales, vecinos o incluso los amigos podrían hacer un mal uso de la misma por intereses comerciales o criminales.

Nadie puede predecir cómo será la vida en una era de genómica personalizada. El Proyecto Genoma Personalizado (PGP), un paso lógico después del Proyecto Genoma Humano, se propone explorar los pros y contras de una genómica personalizada. El genoma y el fenoma de los voluntarios que participen en el proyecto se pondrán a disposición pública.



GEORGE M. CHURCH forma parte de un grupo de voluntarios que se proponen exponer su genoma a la luz pública. Al fondo, imágenes de polonias fluorescentes.

JOHN SOARES

Se incluirán secuencias genómicas completas, de los 46 cromosomas, historiales médicos digitalizados y otros datos que configurarían un perfil personal de salud: información exhaustiva sobre ARN y proteínas, medidas corporales y faciales e imágenes obtenidas por resonancia magnética y otras técnicas. Además, se crearán líneas celulares humanas representantes de cada individuo. Nuestro propósito es hacer que toda esta información sobre genomas y rasgos personales sea ampliamente accesible, de forma que cualquiera pueda aprovecharla para comprobar sus propias hipótesis, algoritmos o desarrollar nuevas teorías.

Un suceso reciente nos proporciona un ejemplo sencillo de lo que podría ocurrir. Unos cuantos historiales médicos del PGP (los míos propios) se hallan ya disponibles en la red; un hematólogo del otro lado del país dio con ellos, los examinó y se puso en contacto conmigo para advertirme de que llevaba un gran retraso en mis análisis de control de mi medicación para el colesterol. Su observación dio lugar a modificaciones en mi tratamiento (cambio de dosis y dieta), que redujeron de forma notable al menos un tipo de riesgo. En el futuro, experiencias como ésta no dependerían de un azar transcontinental, sino que engendrarían una nueva industria de programas informáticos para la gestión de información genómica por parte de terceros.

El PGP cuenta con la aprobación de la comisión de control interno de la facultad de medicina de Harvard. Como todos los sujetos sometidos a investigación, los participantes del proyecto deben ser informados de los riesgos que entraña el estudio, antes de permitir que se hagan públicos sus datos. Cada nuevo voluntario reclutado para el PGP tendrá derecho a revisar la experiencia de los individuos que lo han precedido, antes de prestar su consentimiento informado. Un proyecto abierto —que permite la plena identificación de los sujetos y sus datos— es menos arriesgado, para los participantes así como para el propio estudio, que una promesa de privacidad. En el segundo caso podría filtrarse información, de una manera accidental o criminal.

Lo mismo que la política de libre acceso a los datos establecida por el PGH, el aperturismo del PGP se propone maximizar las posibilidades de descubrimiento. Amén de proporcionar un recurso científico, el proyecto ofrece un experimento en acceso público y cobertura de seguros. En las primeras etapas, donantes privados costearán el seguro de varias personas contra eventuales discriminaciones genéticas.

res de bases por dólar, lo que viene a representar una rebaja de nueve veces en el precio. (El grupo de 454 no ha publicado los costes de su proyecto.)

Se espera que estas y otra nuevas técnicas reduzcan pronto el coste de la secuenciación de los seis mil millones de pares de bases que contiene un genoma humano a 100.000 dólares. Que los métodos de secuenciación de próxima generación consigan abaratar todavía más el proceso dependerá de varios factores. Ahora que la automatización es algo común en todos los sistemas, el grueso del gasto se debe a los reactivos químicos y a los aparatos. La miniaturización ha reducido ya las cantidades de reactivos empleados respecto a las reacciones de Sanger mil millones de veces: de microlitros a femtolitros.

Muchos sistemas de formación de imágenes obtienen datos sin depurar a razón de mil millones de octetos (un gigaocteto o *gigabyte*) por minuto; los ordenadores procesan luego la información a una velocidad de varios miles de millones de operaciones por segundo. Por tanto, cualquier dispositivo de obtención de imágenes cuya velocidad esté limitada por procesos físicos o químicos lentos (electroforesis o reacciones enzimáticas), o cuya operatividad no esté concentrada en el espacio y el tiempo verá mermado su rendimiento.

En la evaluación de las técnicas de secuenciación emergentes deben considerarse también las aplicaciones. Los métodos recientes suelen operar con tramos de lectura cortos, de cinco a 400 pares de bases, en comparación con los de Sanger, de 800 pares de bases. Por ello mismo, la secuenciación y la unión, desde cero, de las piezas de un genoma resultan más laboriosas con las nuevas técnicas. Sin embargo, si éstas se aplican en medicina, se ordenarán hacia la resecuenciación, en busca de variaciones mínimas en el ADN de los individuos. Una escasa longitud de los tramos de lectura no representará, por tanto, ningún problema.

Los requerimientos de exactitud dependerán también de las aplicaciones. Los usos diagnósticos podrían requerir una reducción en las tasas de error por debajo del patrón actual del PGH del 0,01 por ciento (600.000 errores por genoma humano). En el otro extremo del espectro, el muestreo al azar del genoma, con una tasa de error elevada (4 por ciento), ha resultado útil para el descubrimiento y clasificación de varios tipos de ARN y tejidos. Una estrategia similar de secuenciación aleatoria (*shotgun*) se aplica en el muestreo ecológico, en el cual sólo 20 pares de bases bastan para identificar a un organismo en un ecosistema.

Un valor en alza

Más allá del desarrollo de estas nuevas técnicas de secuenciación, deberán resolverse, en poco tiempo, aspectos importantes que posibiliten el advenimiento de la lectura del genoma a bajo coste. Habrá que pergeñar programas informáticos que procesen la información genómica de un modo inteligible por los médicos, quienes necesitarán un método para deducir, para cada paciente, una lista de las variaciones genéticas de mayor importancia. Deberán evaluarse también los efectos que el acceso generalizado a esta técnica ejercerá sobre la población.

Desde su inicio, el PGH estableció un programa de 10 millones de dólares anuales para estudiar y tratar los conflictos éticos, legales y sociales que podrían surgir con motivo de la secuenciación del genoma humano. Los participantes acordamos poner los resultados obtenidos a disposición del público con una prontitud sin precedentes (en menos de una semana desde su descubrimiento); rechazamos cualquier intento de comercializar la naturaleza humana. Especial atención mereció también la protección del anonimato de los genomas públicos (el “genoma humano” que presentamos corresponde a un mosaico de los cromosomas de varios individuos). Siguen pendientes, sin embargo, las cuestiones acuciantes. ¿Cómo asegurar la privacidad y la transparencia en el uso de la información genética personal por investigadores, compañías aseguradoras, empresas, tribunales, escuelas, agencias de adopción, gobiernos e individuos que tomen decisiones médicas o relativas a la reproducción?

Las cuestiones de índole ética y jurídica deben abordarse con el mismo rigor que los aspectos técnicos y biológicos de la genómica humana. Por ello hemos iniciado el Proyecto Genoma Personalizado, diseñado para explorar los pros y los contras de vivir en la era de la genómica personalizada.

Cuando invertimos en bolsa o en el mercado inmobiliario, lo hacemos conscientes de su riesgo. Pensamos en términos de probabilidades, sopesamos el riesgo y el valor; aceptamos que los mercados, como la vida, son complejos. Del mismo modo que las técnicas digitales personales han provocado revoluciones económicas, sociales y científicas que apenas imaginamos cuando llegaron los primeros ordenadores, debemos esperar y prepararnos para cambios similares tras la secuenciación de los primeros genomas descodificados.

El autor

George M. Church es profesor de genética en la facultad de medicina de Harvard. Dirige el Centro de genética computacional Lipper en Harvard. Centra su investigación en técnicas de análisis y síntesis biomolecular y celular.

Bibliografía complementaria

ADVANCED SEQUENCING TECHNOLOGIES: METHODS AND GOALS. Jay Shendure, Robi D. Mitra, Chris Varma y George M. Church en *Nature Reviews Genetics*, vol. 5, págs. 335–344; mayo 2004.

HOW SEQUENCING IS DONE. DOE Joint Genome Institute, U.S. Dept. of Energy, Office of Science, actualizado el 9 de septiembre de 2004.

ACCURATE MULTIPLEX POLONY SEQUENCING OF AN EVOLVED BACTERIAL GENOME. Jay Shendure et al. en *Science*, vol. 3, págs. 1728–1732; 9 de septiembre, 2005.

GENOME SEQUENCING IN MICROFABRICATED HIGH-DENSITY PICOLITRE REACTORS. Marcel Margulies et al. en *Nature*, vol. 437, págs. 376–380; 15 de septiembre, 2005.

El tsunami del Indico

Después de las trágicas consecuencias del tsunami acontecido en el océano Indico en diciembre de 2004, los científicos y los centros de alerta se encuentran mejor preparados para generar modelos que describan estas olas monstruosas y predecirlas

Eric L. Geist, Vasily V. Titov y Costas E. Synolakis

1. LA LECCION EXTRAIDA DEL MURO DE AGUA de 30 metros de altura que golpeó las costas del Indico en diciembre de 2004 ha permitido refinar las simulaciones informáticas de los tsunamis.

El 26 de diciembre de 2004, una serie de olas devastadoras arrasó las costas del océano Indico. Nunca un tsunami había causado tantas víctimas. Las olas que destrozaron pueblos y ciudades enteras mataron a más de 225.000 personas en cuestión de horas y dejaron sin hogar a un millón, por lo menos.

El desastre puso de relieve un hecho muy importante: con el aumento de la población en las regiones costeras de todo mundo se multiplica el peligro potencial de los tsunamis. El de 2004, el mejor documentado de la historia, ofrece una oportunidad única para aprender a evitar en el futuro este tipo de catástrofes. La abundante información que ha generado, se trate de vídeos domésticos en los que se observa el mar y el barro entrando en los hoteles de las playas o consista en observaciones por satélite de la propagación de las olas por el océano, ha modificado los conocimientos científicos sobre los tsunamis.

El sorprendente origen del tsunami —se propagó desde una zona donde no se esperaba que naciesen olas gigantes— ha ampliado la lista de zonas en riesgo. Las observaciones del fenómeno han puesto a prueba las simulaciones informáticas que predicen dónde y cuándo se producirá un tsunami y cómo se comportará tierra adentro. Y se ha visto que la forma y el tamaño de un tsunami dependen, en buena medida, de la manera en que se desarrolle el terremoto que lo impulsa. Los modelos refinados que han resultado de estos descubrimientos valdrán, junto a los nuevos sistemas de seguimiento y alerta, para salvar vidas.

Antes del gran tsunami

Se sabe que la mayoría de los terremotos capaces de generar tsunamis se producen en zonas de subducción atravesadas por inmensas fosas submarinas. Se forman allí donde una de las placas tectónicas en que se divide la corteza terrestre se desliza bajo otra. Las fuerzas gravitatorias y la circulación profunda del material viscoso del manto terrestre mantienen en mutuo movimiento las placas. Sin embargo, la fricción entre ellas en la

MATHEW FREY *Wood Ronsaville Harlin, Inc.*



corteza superficial las paraliza temporalmente. Como resultado, la tensión aumenta en la falla, o interfaz de contacto entre dos placas. Algunas veces, esa tensión se libera de repente en un terremoto poderoso. La placa hundida se sumerge aún más y empuja, con violencia y hacia arriba, el sector de placa suprayacente, desplazando al mismo tiempo el mar que la cubre. La magnitud del tsunami resultante dependerá del movimiento de fondo marino. Una vez generado, el tsunami se divide en dos; uno se desplaza rápidamente hacia tierra; el otro se interna en mar abierto.

En la parte oriental del océano Indico, frente a las costas del oeste de Sumatra, isla de Indonesia, la placa India se hunde bajo la placa Euroasiática a lo largo de la zona de subducción de Sumatra. Las partes meridionales de esta zona de fractura provocaron ya antes grandes terremotos (de magnitud 9), el más reciente en 1833; Kerry Sieh y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de California, han hallado antiguos arrecifes coralinos levantados por aquellas catástrofes. Por eso se esperaba que se produjese allí otra sacudida violenta.

Sin embargo, la de diciembre de 2004 creó desconcierto, pues se originó en la parte septentrional de esa región, al noroeste de Sumatra. Hasta entonces, se había estado registrando allí, a lo largo de la falla marina, un movimiento mucho más lento, por lo que era poco probable que la tensión aumentara hasta el punto de provocar semejante temblor. Análisis posteriores revelaron que el seísmo de magnitud 9 levantó una extensión de fondo marino de 1200 kilómetros hasta 8 metros en algunos lugares y abrió una zona de fractura equivalente al área de California, desplazando centenares de kilómetros cúbicos de agua marina sobre el nivel del mar normal. Se admite ya que el riesgo de que se produzcan tsunamis en Alaska, Puerto Rico y otras zonas de subducción similares es mayor de lo que se creía.

El temblor de Sumatra-Andamán empezó a las 7:59 de la mañana, hora local. La red global de estaciones sísmicas avisó enseguida al Centro de Alertas de Tsunamis del Pacífico en Ewa Beach, Hawai. Aunque los geofísicos se contaron entre los primeros, fuera de la zona, en enterarse del terremoto, no tuvieron posibilidad de confirmar que un tsunami mortal atravesaba el océano Indico antes de que llegaran las primeras noticias de la catástrofe.

En el océano Pacífico, donde ocurre el 85 por ciento de los tsunamis, los tsunómetros, sensores remotos, detectan el fenómeno en alta mar y avisan a los científicos del Centro de Alertas del Pacífico y a los de un segundo centro en Palmer, Alaska, antes de que las olas alcancen tierra firme. No existían estos medios para el océano Indico; tampoco líneas de comunicación que alertasen a las poblaciones costeras. Aunque las primeras olas tardaron dos horas o más en alcanzar Tailandia, Sri Lanka y muchas otras regiones castigadas, a casi todo el mundo le tomó por sorpresa.

En mar abierto

Ese día de diciembre cambió nuestra concepción sobre el daño potencial que los tsunamis entrañan, el lugar donde golpean y la indefensión absoluta de la población. Desde entonces, se han ido creando grupos internacionales para rectificar esta situación, al tiempo que los investigadores han venido analizando las huellas dejadas por el episodio para conocer el desencadenamiento, propagación y destrucción costera de los tsunamis, para conjurar los daños de la próxima vez.

A lo largo de quince años, investigadores de Japón y Estados Unidos han ido desarrollando modelos informáticos que simulan la propagación de un tsunami en alta mar. Se tenían pocas observaciones con las que comprobar las teorías. Todos los modelos de propagación de tsunamis se basan en dos variables clave: una estimación de la localización y extensión del fondo oceánico deformado, que se obtiene a partir del epicentro y la magnitud del terremoto, y una medida de la altura, o amplitud, del agua desplazada. Una deducción de ésta que valga para efectuar pronósticos sobre la marcha requiere la observación directa de las olas del tsunami en mar abierto.

En los grandes tsunamis anteriores, sólo se contaba con los registros de los mareómetros cercanos a las costas o las estimaciones de los topógrafos fundadas en los daños causados por el agua en el litoral. El principal obstáculo reside en el tamaño real del tsunami, que se desdibuja cerca de la costa con las olas adicionales formadas cuando rebota contra los espigones, alcanza e inunda islas o se adentra en una bahía. Todo ello enreda aún más la información.

Por pura coincidencia, un trío de satélites suministró la información necesaria acerca de la altura de las olas del tsunami del océano Indico, precisa y sin distorsiones. Sobrevolaron la región entre dos y nueve horas después del terremoto. Nunca antes se había medido con radares la propagación de un tsunami por alta mar. Los resultados probaron que, tal y como se suponía, un aumento del nivel del agua en mar abierto de tan sólo medio metro puede convertirse en inmensas olas que arrasarán las costas.

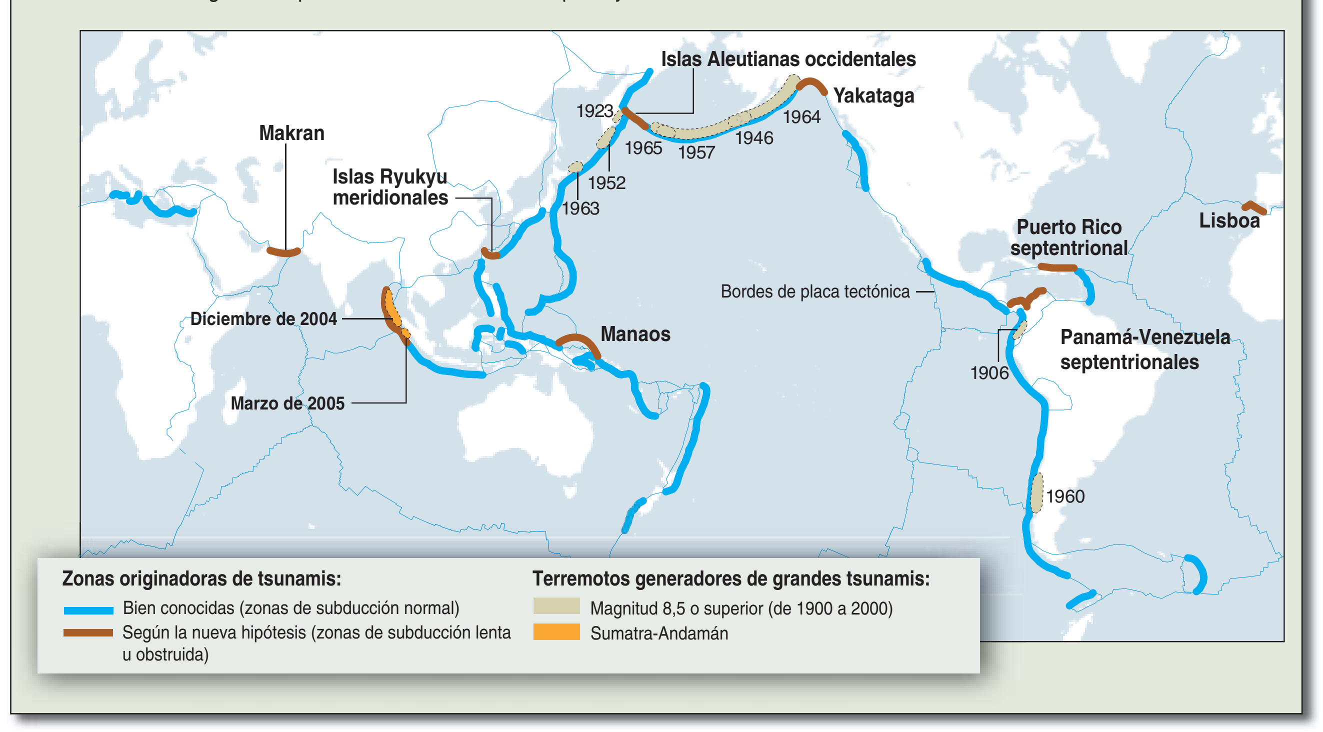
Los satélites, que se movían con respecto al suelo a 5,8 kilómetros por segundo, observaron también de manera continua las olas; hasta entonces sólo se tomaban medidas en puntos concretos, como lo hacen los mareómetros. Las alturas de las olas así determinadas y las previstas por los modelos coincidieron bastante: se validaron en líneas generales las teorías sobre el desarrollo de los tsunamis en mar abierto y se confirmó que los actuales paradigmas

Resumen/Previsiones

- La abundante información obtenida tras el catastrófico tsunami del océano Indico en diciembre de 2004 ha transformado nuestra manera de entender esas olas monstruosas.
- Gracias a los nuevos datos, se ha aprendido a pronosticar mejor las zonas susceptibles de sufrir un tsunami, hacia dónde se dirigirá y la altura que alcanzará en tierra.
- Los modelos informáticos resultantes, depurados y conjugados con nuevos sistemas de seguimiento y alerta, contribuirán a salvar vidas.

REPLANTEAMIENTO DEL ORIGEN DE LOS TSUNAMIS

Los mayores terremotos generadores de tsunamis del siglo pasado (*óvalos marrones*) ocurrieron entre dos placas tectónicas, en zonas de subducción (*líneas azules*). Una de las placas empuja hacia arriba la otra, generando olas de tsunami a lo largo de la subducción. Sin embargo, la parte de la falla de Sumatra-Andamán donde se originó el desastre del océano Indico no había registrado antes temblores de magnitud superior a 8. Cuando allí se produjo el terremoto de magnitud 9 de diciembre de 2004, seguido de otro de magnitud 8,7 tres meses después, se reconsideraron otras fallas parecidas, de deslizamiento lento. Se admite ahora que podrían también generar tsunamis. Entre las nuevas regiones de interés (*líneas rojas*) se incluyen las que por las características del fondo oceánico suponen un obstáculo a la subducción e incrementan así la tensión en las fallas.



EMILY COOPER

resultaban útiles para la protección civil, incluso en el caso de un gran tsunami.

Alcance mundial

El alcance mundial del tsunami corroboró, además, que los modelos valen para la previsión. Como un tsunami se desplaza por el fondo oceánico a la velocidad de un avión (de 500 a 1000 kilómetros por hora), la primera ola tardó menos de tres horas en propagarse desde el norte de Sumatra y las islas Andamán hasta Myanmar (Birmania), Tailandia y Malasia por el este, y hasta Sri Lanka, India y las Maldivas por el oeste. En 11 horas alcanzó la costa africana, a 8000 kilómetros de distancia, el punto más lejano donde hubo víctimas mortales.

Pero las olas no se pararon allí. Al mismo tiempo que se conocía la tragedia, empezaron a llegar registros de mareómetros de todo el mundo. De camino hacia el oeste, el tsunami giró alrededor del extremo sur de Africa y, mientras surcaba el Atlántico hacia el norte, se dividió: un brazo se dirigió al Brasil y el otro a Nueva Escocia. Hacia el este, pasó entre Australia y la Antártida y se internó en el Pacífico, donde llegó hasta Canadá. Desde la erupción del Krakatoa en 1883 no se tenía noticia de un tsunami que hubiera llegado tan lejos.

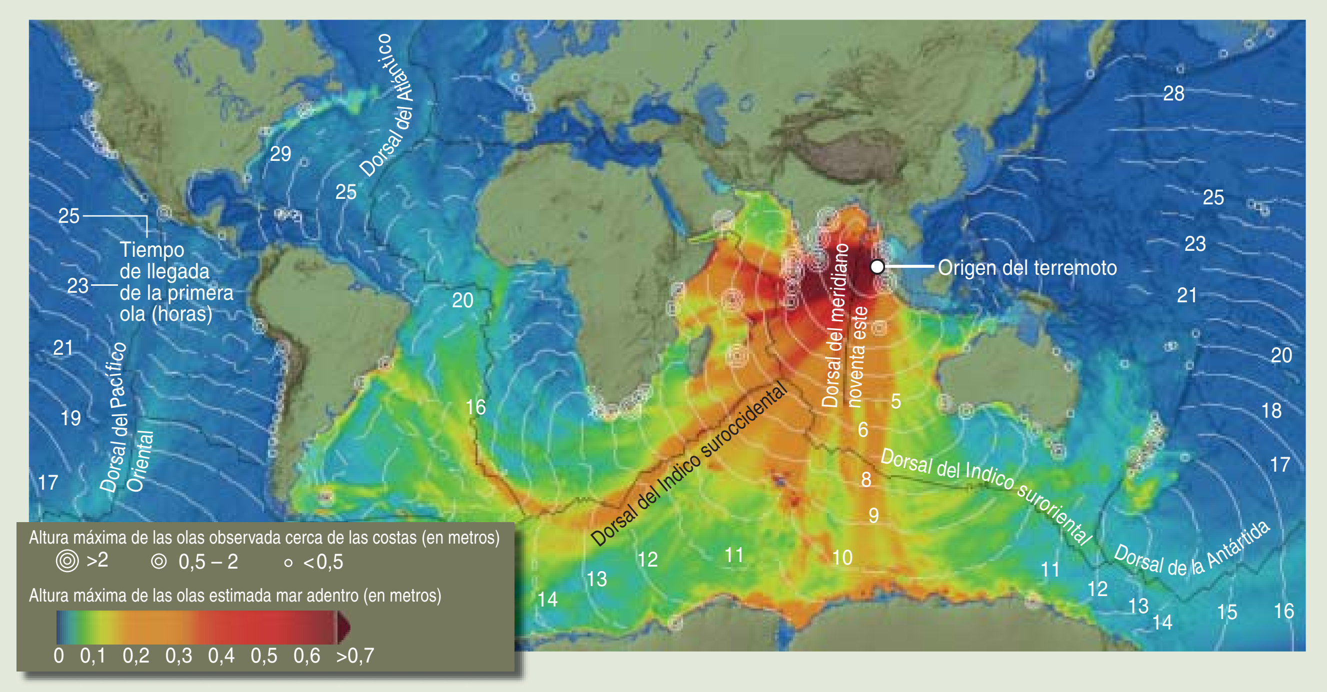
Al introducirse la trayectoria completa del tsunami en la simulación informática Método de Escisión de Tsunamis (MOST) de la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional de Estados Unidos (NOAA), las alturas de las olas calculadas por el ordenador coincidieron bastante bien con las mediciones realizadas por varios mareómetros. Más aún, el modelo explicó cómo pudo recorrer el tsunami distancias tan largas. Un mapa de las alturas de las olas en la simulación mostró que eran mayores a lo largo de las dorsales mesooceánicas. Estas dorsales, que conectan una cuenca oceánica con otra, parecen canalizar la energía de la ola más allá de lo que hubiera llegado en condiciones habituales. Conocer este efecto resulta muy útil para las previsiones, ya que los simuladores pueden estimar mejor hacia dónde se dirigirá la parte más intensa de la energía de la ola.

Las secuelas inmediatas

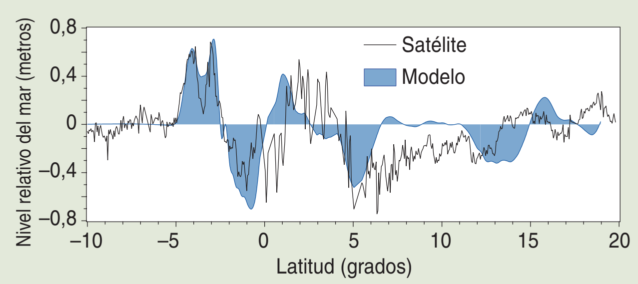
Predecir el comportamiento del tsunami, una vez alcanza tierra, resulta mucho más difícil. Como les ocurre siempre a los tsunamis, el de diciembre de 2004 perdió gradualmente velocidad a medida que entraba en aguas someras. Cuando las olas alcanzaron la costa, la distancia entre las crestas, centenares de kilómetros en mar abierto, se había quedado en 15 o 20 kilómetros. Con el agua más veloz empujando desde atrás, las olas iban alcanzando más y más altura, hasta 30 metros en la provincia de

PRONOSTICO DE LA EVOLUCION DE LOS TSUNAMIS

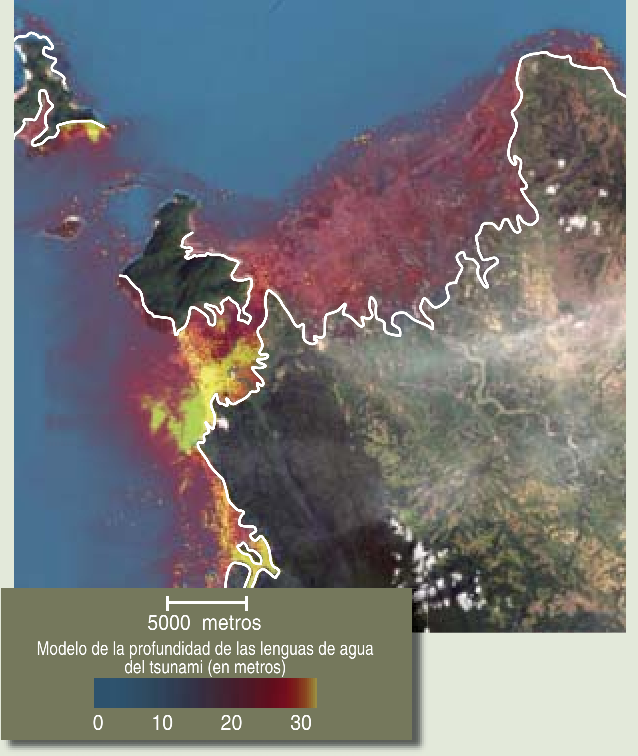
Las observaciones del tsunami de diciembre de 2004 confirmaron en líneas generales lo que ya se sabía de tres aspectos clave del comportamiento de los tsunamis: su propagación alrededor del mundo, el aspecto de las grandes olas en mar abierto, así como la altura y distancia que pueden alcanzar en tierra. Cada imagen compara mediciones directas con valores calculados por el último modelo informático de predicción de tsunamis de Estados Unidos, MOST.



UNA VISION GLOBAL de la trayectoria del tsunami muestra que las olas más altas mar adentro según el modelo (*colores cálidos*) se correlacionan bien con las olas más altas que los mareómetros midieron cerca de las costas (*círculos grandes*). La primera ola (*líneas blancas*) tardó unas 30 horas en llegar a Canadá.



LA ALTURA DE LAS OLAS en mar abierto —medidas por el satélite Jasón-1 mientras orbitaba sobre el océano Indico, dos horas después del terremoto que originó el tsunami (*líneas negras*)— coincide, mejor de lo esperado, con los cálculos del simulador (*áreas azules*). Los máximos representan las crestas de las olas; los mínimos, los senos.



LAS LENGUAS DE AGUA DEL TSUNAMI que inundaron determinadas zonas del norte de Sumatra, en la provincia de Aceh, alcanzaron alturas de 30 metros y llegaron hasta 4,5 kilómetros tierra adentro. Una vez más, las zonas que el modelo predijo que se inundarían (*color superpuesto*) concuerdan con las medidas de campo y las imágenes de satélite posteriores a la catástrofe (*regiones costeras con líneas blancas*).

VASILY V. TITOV

Aceh, en Sumatra, la primera región afectada.

Las olas, que llevaban aún una velocidad de entre 30 y 40 kilómetros por hora, se internaron más de 4 kilómetros tierra adentro en algunas partes de la ciudad de Banda Aceh. Y retrocedieron con la misma violencia, arrastrando al mar todo lo que encontraban a su paso. A lo largo de la costa inundada, las olas castigaron durante horas. Además, como el período entre crestas era de unos 30 minutos o más, muchos volvieron a las playas, donde se encontraron con las olas siguientes. La devastación del entorno fue tan monstruosa, que podía verse desde el espacio.

Teniendo en cuenta la multiplicidad de factores que intervienen, ¿podrían los modelos predecir la pluralidad de efectos? Hasta principios de los años noventa, por culpa de irresolubles complejidades informáticas, el mejor de los simuladores debía terminar sus cálculos mar adentro o en la línea de costa. Se utilizaba la última altura de las olas para calcular la penetración tierra adentro del tsunami en tierra. Sin embargo, los primeros estudios de los desastres causados por tsunamis mostraron que esos cálculos eran erróneos. En el tsunami que afectó a Nicaragua en 1992 se realizaron las primeras mediciones de campo exhaustivas, para compararlas con los modelos predictivos. En algunos lugares, las inundaciones reales decuplicaron las pronosticadas por los modelos.

Se promovió la pugna entre programadores japoneses y estadounidenses por ver quién describía con mayor precisión el alcance de la inundación mediante el cálculo completo de la evolución del tsunami en tierra firme. Con la combinación de experimentos de laboratorio a gran escala y medidas de campo de tsunamis posteriores, la precisión de los modelos TUNAMI-N2 (japonés) y MOST (estadounidense) mejoró hasta que su estimación de las inundaciones coincidió con lo ocurrido en la mayoría de los tsunamis precedentes, al menos en la medida en que se disponía de datos de alta resolución de la topografía del litoral y del mar abierto.

Japoneses y norteamericanos desconocían, sin embargo, si los modelos alcanzarían idénticas prestaciones ante un tsunami poderoso. Pues bien: los modelos describieron las inundaciones del océano Indico mejor de lo esperado a pesar de la falta de información detallada sobre el paisaje costero.



2. LAS VIAS RETORCIDAS DEL FERROCARRIL cerca de la población costera de Sinigame, en el sur de Sri Lanka, donde descarriló un tren de pasajeros de ocho vagones en diciembre de 2004. Se calcula que perecieron 1500 personas.

JIMIN LAI *AFP/Getty Images*

Pero los supervivientes del tsunami en Indonesia y otros lugares no tardaron en descubrir que las predicciones de la altura alcanzada por la inundación no siempre dan por sí solas una idea del verdadero efecto de un tsunami. En muchas localidades de Tailandia y Sri Lanka, la inundación alcanzó una altura de 4,5 metros o menos, y sin embargo la devastación fue comparable con la padecida por Aceh, donde el agua subió seis veces más. Otro efecto inesperado y turbador fue que, en Banda Aceh, las olas destrozasen manzana tras manzana de estructuras reforzadas de hormigón que habrían resistido el temblor sísmico.

Para calcular el grado de destrucción, Ahmet C. Yalciner, de la Universidad de Oriente Medio en Ankara, y uno de los autores (Synolakis) están desarrollando nuevos tipos de medición de catástrofes —patrones que los ingenieros de costas puedan emplear para calcular la fuerza de las olas de los tsunamis sobre las estructuras— que incluyen las grandes corrientes, más fuertes en las inundaciones de los tsunamis que en las mareas y las olas provocadas por tormentas.

Las sorpresas del temblor

Podría decirse que el mayor interrogante científico sobre el tsunami del océano Indico fue el mismo terremoto. Aunque todavía hoy se discute su magnitud, algunas estimaciones la sitúan en un 9,3. Fue el mayor seísmo desde el sufrido por Alaska de 1964. Ha costado mucho determinar cómo la falla de Sumatra-Andamán provocó un temblor tan gigantesco.

Desde cualquier punto de vista, fue un terremoto asombrosamente complejo. Por lo normal, el deslizamiento de la falla suele ser mayor al principio, cerca de su origen. En algunos casos, sin embargo, la fractura de la falla empieza con un pequeño deslizamiento, señal que pronostica un terremoto pequeño; sin embargo, luego afecta a alguna parte de la falla más débil o más tensa. La tensión se libera violentamente, causando un terremoto mayor y un tsunami. Esto es lo que sucedió en el Indico en 2004. Resulta difícil analizar a tiempo un caso así, para dar un aviso útil.

Este fenómeno sorprendente puso a prueba los modelos de predicción de tsunamis de NOAA. Si se los hubiera ejecutado sólo con información sísmica, el resultado habría subestimado, en diez veces por lo menos,

las alturas del tsunami en mar abierto. Al añadir la primera medición directa de la amplitud del tsunami, obtenida por un mareómetro de las islas de Cocos unas tres horas y media después del terremoto, los resultados mejoraron considerablemente. Pero aún faltaba algo.

En los días posteriores al terremoto, el análisis de las fuertes ondas sísmicas de la sacudida indicó que la fractura inicial de la falla se desplazó hacia el norte de Sumatra a una velocidad de 2,5 kilómetros por segundo. También localizó con exactitud los sectores de mayor deslizamiento y, por lo tanto, los principales generadores del tsunami. El problema para los modeladores del tsunami era que ninguna de las soluciones sísmicas incluía un movimiento de la falla de tal magnitud, que reprodujera la altura de las olas en mar abierto observada por los satélites y la profunda inundación de Banda Aceh.

La pista fundamental vino de las estaciones continentales que registran, con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), movimientos de tierra mucho más lentos que los producidos por las ondas sísmicas. Gracias a ellas sabemos que el movimiento de la falla continuó, aunque lentamente, incluso después de haber dejado de emitir energía sísmica. Si bien es cierto que tiene un límite la lentitud a la que puede deslizar una falla y generar todavía un tsunami, es muy probable que ese fenómeno de "posdeslizamiento", a menudo pasado por alto, explique las sorprendentes alturas alcanzadas por un tsunami. Si fuera así, convendría que en adelante los sistemas de alerta de tsunamis incorporasen lecturas continuas de GPS.

De lleno o a lo lejos

Está claro que los factores específicos de cualquier terremoto ejercen un temible control sobre los tsunamis. Como si quisiera recalcarlo, la Tierra produjo otro gran temblor a lo largo de la misma falla el 28 de marzo de 2005. La fractura inicial ocurrió a una distancia parecida de la costa de Sumatra y prácticamente a la misma profundidad en el fondo oceánico que cuando el terremoto de diciembre. Aunque ambos temblores se encuentran entre los diez mayores registrados desde 1900, generaron tsunamis totalmente diferentes.

Cuando observaron el terremoto de marzo de magnitud 8,7 en las pantallas de sus ordenadores, en el Centro de Alertas de Tsunamis del Pacífico se temieron lo peor. El poderoso movimiento del suelo causó graves daños, pero no hubo noticias inme-

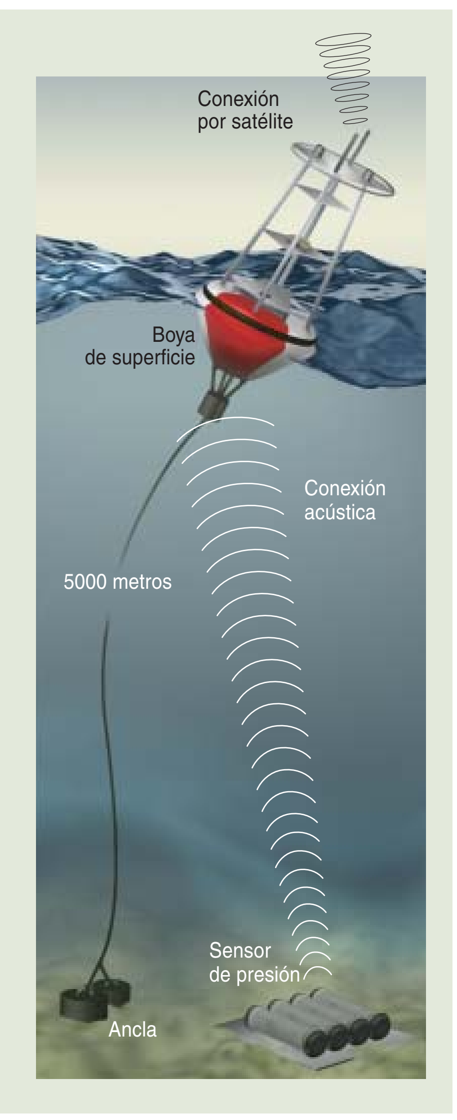
Alertas para el futuro

Antes del terremoto de diciembre de 2004, el océano Indico no tenía ningún sistema de alerta de tsunamis. Desde entonces, varios grupos internacionales, coordinados por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO, se han esforzado por corregir el problema. Para alcanzar la capacidad de seguimiento instalada en el Pacífico, el océano Indico necesita tres componentes técnicos fundamentales: una mejor red sísmica para localizar los grandes terremotos, un mínimo de cinco tsunómetros (*derecha*) para detectar las olas de tsunami a medida que atraviesan el océano (aunque serían necesarios 13 para dar con un tsunami en menos de 30 minutos) y una red de mareómetros en tiempo real en el litoral.

En 2005 se dieron algunos pasos importantes. Dos redes sísmicas —una de ellas nueva— proporcionan datos automáticamente a los centros nacionales de terremotos de Indonesia y Malasia; muy pronto, Malasia pondrá su información a disposición de toda la región. Se han adaptado 4 mareómetros para el seguimiento de tsunamis. Uno de ellos está cerca de Indonesia, en las inmediaciones de la mayor falla generadora de tsunamis.

Una vez que los sistemas de alerta estén disponibles, habrá todavía que poder distribuirlas por las poblaciones costeras. A lo largo de la mayor parte de los 66.000 kilómetros de costa del océano Indico, la primera ola no llegaría sino a las dos horas o más, tiempo suficiente para que la mayoría de la población pudiera trasladarse hacia el interior en el caso de que sonara la alarma. En los lugares donde las olas llegaran en una hora o menos, la alarma llegaría demasiado tarde. En su lugar, los residentes habrían de reconocer las señales naturales: grandes temblores y el retroceso del océano previo a la llegada de la gran ola.

Añádase que una evacuación rápida a zonas de seguridad predefinidas es esencial. Las autoridades locales realizan ya simulacros en Tailandia, Sri Lanka e Indonesia que fueron duramente castigadas en 2004.



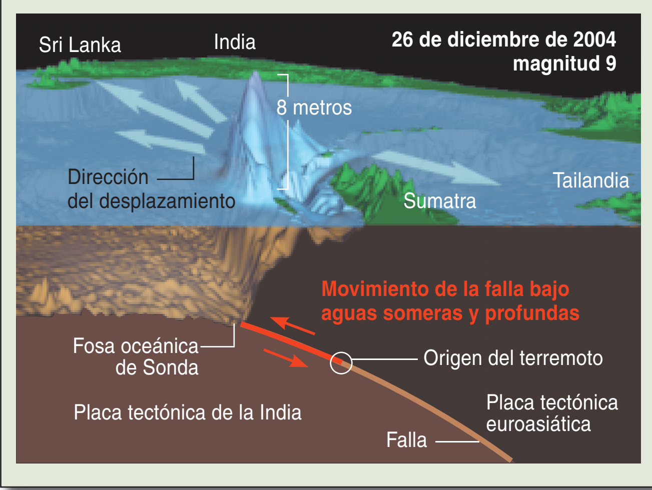
El tsunámetro incluye un sensor de presión situado en el fondo del mar que envía una señal acústica a la boya de la superficie cuando detecta que pasa un tsunami. La boya reenvía la alerta vía satélite a las autoridades responsables de la alarma sonora.

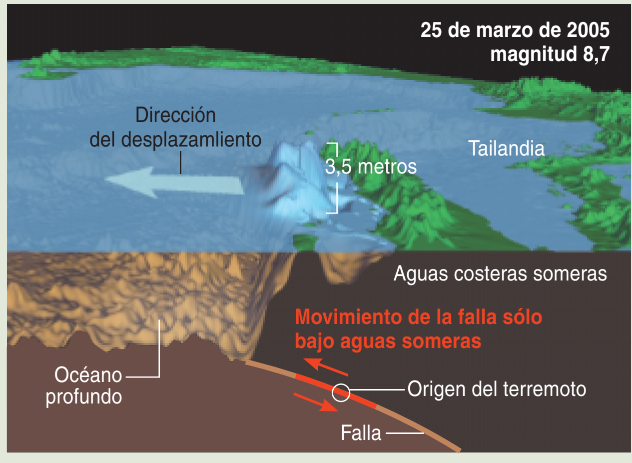
EMILY COOPER

TERREMOTOS DIFERENTES

El 28 de marzo de 2005, tres meses después del tsunami generado por el terremoto de diciembre de 2004, se produjo un segundo terremoto en la misma falla. Las olas iniciales originadas por los temblores medían 8 metros de altura en diciembre y 3,5 metros en marzo (en los diagramas siguientes, se exagera para comparar mejor ambas sacudidas). Tras investigaciones detalladas, se han planteado cuatro causas fundamentales de unas diferencias tan inesperadas.

El seísmo de marzo liberó sólo un quinceavo de la energía del terremoto anterior (fue de magnitud de 8,7, mientras que la magnitud del de diciembre pasó de 9). Se desencadenó a lo largo de una parte más profunda de la falla (*rojo*), lo que limitó la energía que empujó hacia arriba el agua que había encima. Ocurrió bajo aguas someras, por lo que ascendió un volumen menor de agua; en diciembre, parte del tsunami se generó sobre la profunda fosa oceánica de Sonda. Finalmente, el terremoto de marzo tuvo lugar unos 100 kilómetros más al sur; por ello, la mayoría de las olas que se desplazaron hacia el este chocaron contra Sumatra, lo que protegió Tailandia y Malasia. Las olas que se desplazaban hacia el oeste se dirigieron mar adentro; en diciembre, las olas que viajaban al este y las que lo hacían hacia el oeste afectaron a las masas continentales cercanas.





FUENTE: ERIC L. GEIST

diatas de destrozos provocados por un tsunami. Un equipo internacional (Titov, uno de los autores, entre ellos) visitó la zona dos semanas después. Calculó que la altura alcanzada por el tsunami al romper era de 4 metros: podría haber sido letal. Algunos indonesios dijeron que habían aprendido de su primera experiencia y que huyeron hacia el interior cuando tembló la tierra. Pero una mejor evacuación fue sólo uno de los motivos por los que el tsunami de marzo no se llevó más vidas.

El análisis de las réplicas del terremoto de diciembre llevó a Andrew Newman, del Instituto de Tecnología de Georgia, y a Susan Bilek, del Instituto Tecnológico y Minero de Nuevo México, a pensar que en este caso la falla se deslizó cerca de la profunda fosa oceánica; por lo tanto, la parte principal de la falla que se deslizó en marzo se encontraba bajo aguas muy hondas. Así pues, el tsunami de diciembre había tenido más oportunidad de alcanzar altura durante su viaje desde las profundidades oceánicas hasta la orilla. Además, a diferencia del tsunami de diciembre, en marzo el movimiento de la falla sucedió bajo las islas de Nias y Simeulue, lo que limitó la cantidad de agua que la corteza ascendente desplazó.

Una ligera diferencia en la orientación de la falla significó que las olas de los tsunamis tomaran dos direcciones dominantes diferentes. En el caso del terremoto de marzo, la mayoría de las olas dirigidas hacia el este golpearon Sumatra, lo que frenó la energía de las olas en su trayecto hacia Tailandia y Malasia. Las olas que se dirigían al oeste se perdieron en mar abierto; apenas si afectaron a Sri Lanka, India y las Maldivas, que sufrieron tanto en el tsunami de diciembre. Estos ejemplos demuestran la importancia enorme que pueden adquirir pequeñas variaciones en la ubicación de un terremoto.

A pesar de que siempre habrá incertidumbres científicas alrededor de fenómenos tan complejos, la nueva ciencia de los tsunamis está lista para su aplicación. Para salvar vidas, el objetivo consiste ahora en aprovechar los hallazgos científicos en una educación, una planificación y un sistema de alerta mejores.

Los autores

Eric L. Geist, Vasily V. Titov y **Costas E. Synolakis** estudian distintas facetas de los tsunamis. Geist investiga en el Servicio Geológico de los Estados Unidos, en Menlo Park. Con simulaciones informáticas analiza cómo afecta la complejidad de las zonas de subducción a la generación de tsunamis. Titov desarrolló para el NOAA el primer modelo informático de pronóstico de tsunamis y enseña en la Universidad de Washington. Synolakis dirige el Centro de Investigación de Tsunamis de la Universidad de California del Sur, fundado en 1995.

Bibliografía complementaria

FURIOUS EARTH: THE SCIENCE AND NATURE OF EARTHQUAKES, VOLCANOES, AND TSUNAMIS. Ellen J. Prager. McGraw-Hill, 2000.

Páginas del NOAA: www.tsunami.noaa.gov/

Centro de Investigación de Tsunamis de la Universidad de California del Sur: http://cwis.usc.edu/dept/tsunamis/2005/index.php

Servicio Geológico de los Estados Unidos: http//:walrus.wr.usgs.goc/tsunami/

Gotas de cristal líquido

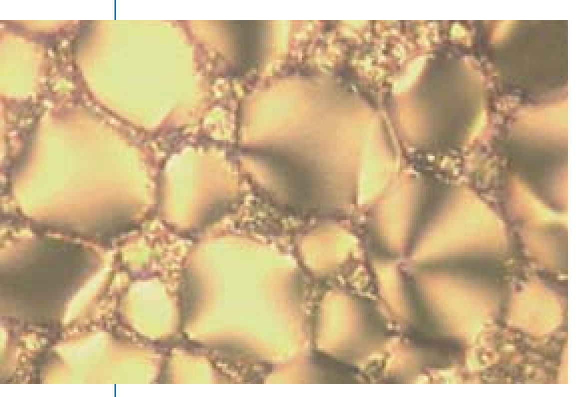
Aplicaciones

Como su propio nombre indica, el cristal líquido es un estado de la materia que posee características tanto del estado líquido como del sólido cristalino. Las fases termodinámicas características del cristal líquido aparecen, por lo general, en sistemas constituidos por moléculas con cierta asimetría geométrica, en particular en aquellos cuyas moléculas, desde el punto de vista físico y en primera aproximación, pueden considerarse cilindros. La bajada de la temperatura induce un cambio de fase desde el estado líquido hacia el estado de cristal líquido, en el que se produce la ruptura de algunas simetrías de la fase de partida, que por ser isótropa (sin direcciones diferenciadas) permanece invariante bajo cualquier operación de simetría. El sistema adquiere por tanto cierto grado de orden —es invariante bajo ciertas simetrías, pero no bajo otras—, se vuelve anisótropo y modifica su energía al cambiar de forma, en analogía con los sólidos cristalinos; sin embargo, en muchos casos fluye y se deforma como lo haría un líquido simple.

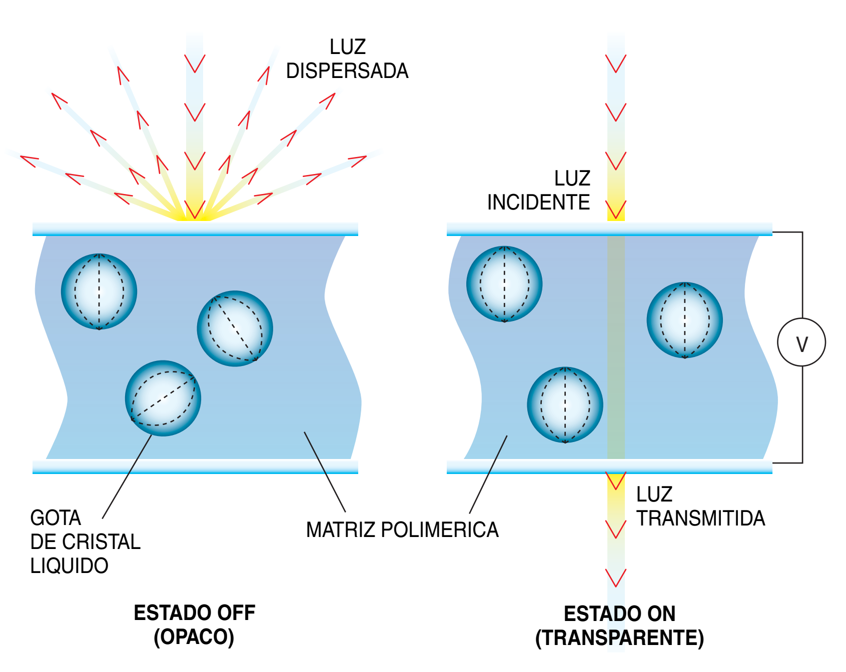
Las particularidades de los estados intermedios entre el líquido y el sólido permiten, entre otras cosas, modificar la orientación de las moléculas mediante la aplicación de campos eléctricos y magnéticos, alterar el estado de polarización de la luz que incide sobre el sistema y manipular el material como si de un líquido se tratase. Se saca partido de estas propiedades en muchas de las aplicaciones industriales basadas en el cristal líquido: visores de relojes digitales y calculadoras, o pantallas de ordenador y de televisión, por poner algunos ejemplos.

Las ventanas “inteligentes” que controlan la cantidad de luz que las atraviesa basan también su funcionamiento en el cristal líquido. Aquí, sin embargo, éste se encuentra localizado en regiones del espacio, en gotas, de tamaño y forma cualesquiera, inmersas en una matriz de plástico (*véase la figura 1*). En ausencia de un campo eléctrico externo (estado OFF), la orientación de las moléculas varía de unas gotas a otras; con la orientación varía el índice de refracción de las gotas (*véase la figura 2*) y por tanto el sistema resultante es opaco a la luz incidente. La aplicación de una diferencia de potencial (estado ON) conduce al alineamiento de las moléculas con el campo, de manera que todas las gotas adquieren el mismo índice de refracción; si éste además coincide con el de la matriz polimérica exterior, la estructura se hace transparente a la luz incidente (*véase la figura 2*).

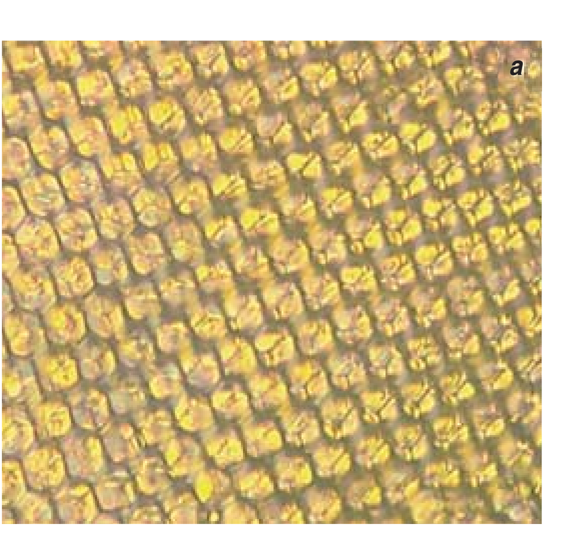
La obtención de gotas de cristal líquido de igual tamaño (“monodis-

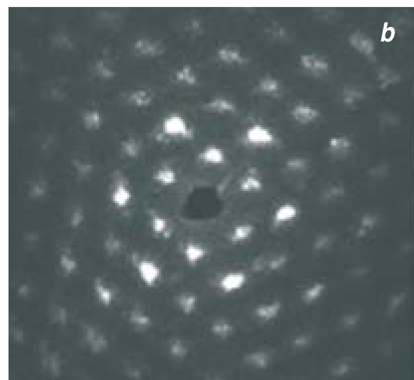


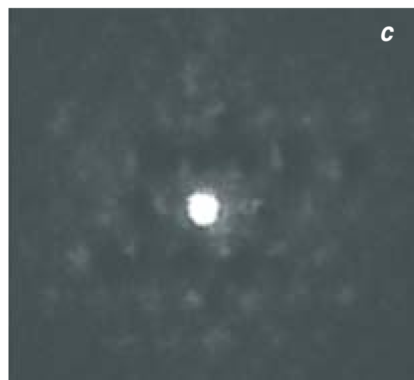
1. Fotografía tomada mediante microscopía óptica de polarización de un conjunto de gotas de cristal líquido en fase nemática (en esta fase, el sistema es desordenado desde el punto de vista traslacional, pero las moléculas apuntan en una dirección que define un vector director; el sistema posee, por tanto, orden orientacional). Las gotas están separadas unas de otras por una matriz polimérica que impide su coalescencia y establece las condiciones de contorno en la superficie para el vector director que caracteriza la fase nemática. Las gotas tienen una forma y orientación distintas, como se deduce de la diferente apariencia que muestran. Puede también observarse la polidispersidad (variedad) en tamaño de las gotas, siendo las mayores de 10^{-5} metros.



2. Esquema de funcionamiento de la técnica de cristal líquido disperso en polímero. En ella se basan las ventanas “inteligentes”.







3. Fotografía de microscopía óptica de polarización que muestra una estructura ordenada de gotas monodispersas de cristal líquido (de un tamaño igual, más o menos 3×10^{-5} metros), estabilizada mediante una matriz polimérica (*a*). Son visibles dos planos de una estructura cristalina hexagonal compacta. Esta estructura difracta la luz incidente, como se muestra en *b*, cuando las gotas presentan el mismo índice de refracción y éste es distinto del de la matriz polimérica. Mediante la aplicación de un campo eléctrico suficiente se consigue que ambos índices de refracción sean iguales y la estructura se vuelva transparente. En estas condiciones, toda la luz incidente se transmite sin desviación, como se puede observar en *c*. La tenue difracción que permanece se debe a que la diferencia de índices de refracción, limitada por los materiales que se emplean, no pudo hacerse cero.

persas”) abre nuevas opciones: se las puede ordenar en estructuras periódicas de dos y tres dimensiones (*véase la figura 3a*). En analogía con la difracción de rayos X por los sólidos cristalinos, estas nuevas estructuras difractan también la luz incidente. Mas, a diferencia de lo que ocurre en los sólidos cristalinos, mediante campos eléctricos y magnéticos externos se puede controlar la cantidad de radiación que se difracta. De ese modo se consigue que el estado del sistema pase de difractor (*véase la figura 3b*) a transparente (*véase la figura 3c*), y viceversa. La dirección de la luz incidente se modifica por la difracción en mayor o menor medida dependiendo fundamentalmente del tamaño de las gotas y de la longitud de onda de la luz que incide sobre el material.

El confinamiento del cristal líquido en una gota de tamaño del orden de 10^{-5} metros o inferior puede llevar a una respuesta a los campos eléctricos y magnéticos considerablemente distinta de la que se suele observar en las películas de ese mismo material. Mientras que en las películas hay que aplicar campos eléctricos por encima de cierto valor crítico, con determinadas gotas de cristal líquido no es necesario: el sistema responde a cualquier campo, sea cual sea su magnitud.

La interacción de la matriz polimérica con las moléculas de cristal líquido de la superficie de las gotas determina la configuración de menor energía del sistema y controla la forma en que la gota responde al campo externo.

La ausencia de una transición crítica desde el estado OFF al estado ON implica reducciones importantes en el valor de los campos que hay que aplicar y permite un control fino del grado de alineación entre las moléculas de la gota y el campo externo; quizá resulte útil en la aplicación de estos nuevos ensamblajes de gotas a la fabricación de pantallas basadas en soportes flexibles, donde el encapsulamiento del cristal líquido es necesario para asegurar el buen contraste del dispositivo.

ALBERTO FERNÁNDEZ NIEVES
Grupo de Física de Fluidos Complejos.
Depto. de Física Aplicada
Universidad de Almería

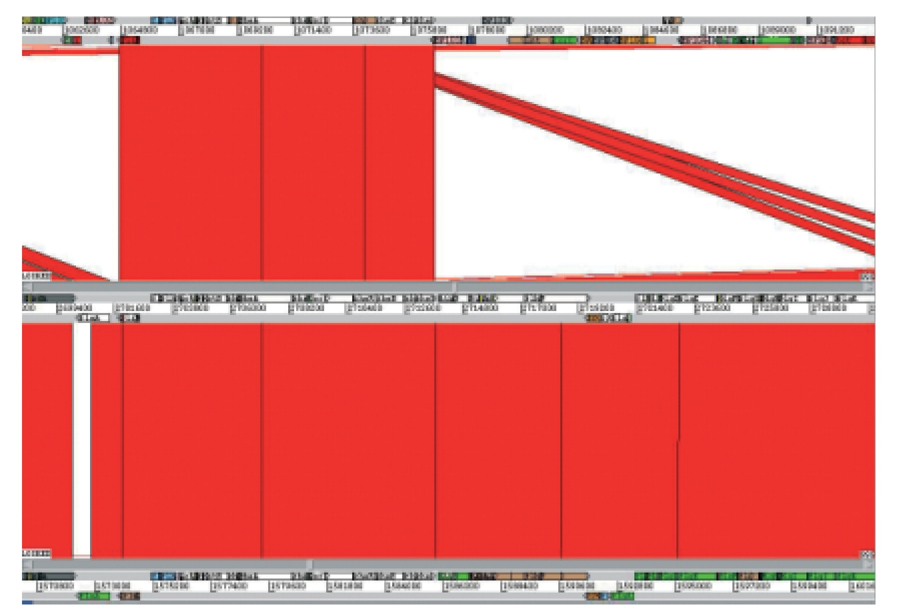
Bordetella

Análisis comparativo de genomas

Las bacterias *Bordetella pertussis*, *Bordetella parapertussis* y *Bordetella bronchiseptica* infectan las vías respiratorias de varias especies de mamíferos. *B. pertussis*, exclusiva de humanos, provoca la tosferina. A humanos y a ovejas infecta *B. parapertussis*, que causa también la tosferina. Por fin, *B. bronchiseptica* origina infecciones respiratorias crónicas en muchos mamíferos.

Con el objetivo de identificar la diferente patogenicidad y el rango de hospedadores de estas tres bacterias, se procedió a la secuenciación y comparación de los tres genomas, en la Unidad de Secuenciación de Patógenos del Instituto de Investigación Wellcome Trust Sanger, de Cambridge. Trabajo que fue publicado en la revista *Nature Genetics*.

Del análisis comparativo de los genomas, destacaríamos tres resultados principales. En primer lugar, *B. pertussis* y *B. parapertussis* podrían haber evolucionado, de forma independiente, a partir de un antepasado común cuyo genoma se aproximara al de *B. bronchiseptica*. En segundo lugar, el genoma de *B. bronchiseptica* muestra un parecido con el genoma de *B. parapertussis* más estrecho que con el de *B. pertussis*. En tercer lugar, la presencia de numerosos pseudogenes —secuencias codificadoras de ADN inactivas—, la reducción en el tamaño del genoma y su drástica reordenación, observadas en *B. pertussis* y *B. parapertussis,* tienen su origen



1. Región correspondiente a los operones flagelares de los tres genomas. La secuencia superior corresponde a *B. pertussis*, la del centro a *B. bronchiseptica* y la inferior a *B. parapertussis*. Las dos bandas grises horizontales de cada genoma representan los dos marcos de lectura del ADN sobre los que se sitúan las secuencias codificadoras. Estas se representan por flechas coloreadas, los pseudogenes (secuencias codificadoras inactivadas) aparecen en color marrón y las bandas verticales de color rojo simbolizan zonas de similitud del ADN entre los genomas.

en el elevado número de elementos de inserción —elementos genéticos móviles que pueden alterar un gen— detectados en el genoma de ambas especies (261 en *B. pertussis* y 112 en *B. parapertussis*).

Entre los factores de virulencia o constituyentes patogénicos de las *bordetellae* encontramos adhesinas, fimbrias, toxinas, sistemas de secreción tipo-III, flagelos y lipopolisacáridos. La expresión génica de muchos de ellos responde a estímulos ambientales; su regulación viene mediada por un sistema dotado de dos componentes. El sistema regulador en cuestión, llamado Bvg, se halla sujeto, asimismo, a regulación; no es funcional durante una fase determinada del ciclo de crecimiento de *Bordetella*.

No se conocen bien las señales que desencadenan los cambios mencionados. Con todo, la investigación *in vitro* sugiere la presumible implicación de las oscilaciones de temperatura y de la presencia de sulfato de hierro y ácido nicotínico en el medio de cultivo.

Debido a la pérdida de genes, por elementos IS (elementos de secuencias de inserción en el ADN) o por inactivación génica, difiere el número de factores de virulencia presentes en cada genoma. La cuantía mayor corresponde a *B. bronchiseptica*. La dispar distribución de factores confiere a cada especie bacteriana su virulencia característica y explica su particular abanico de hospedadores.

El operón de la biosíntesis del pilus tipo-IV, por ejemplo, se encuentra en *B. bronchiseptica*, pero no en los otros dos genomas, que tienen sistemas fimbriales propios. Llámase operón al conjunto de genes bacterianos que constituyen una unidad funcional; en este caso la función a desempeñar es la biosíntesis del pilus tipo-IV, una máquina molecular que interviene en la transferencia de ADN entre bacterias por el pilus, un apéndice, o *fimbria,* en la superficie de las bacterias.

En ese trío de genomas bacterianos difieren también los genes que codifican autotransportadores. Estas proteínas exportadas se integran en la membrana exterior de las células y forman poros que la atraviesan. En muchas bacterias patógenas, los autotransportadores se han relacionado con las interacciones entre procariotas y hospedador; se han relacionado, además, con la virulencia de la bacteria. En cada uno de esos genomas de *Bordetella* hemos encontrado diferentes complementos —enzimas que junto a los anticuerpos ejecutan la reacción inmunitaria— de autotransportadores; fenómeno que apoya la idea de la existencia de distintas formas de interacción entre cada *Bordetella* y su hospedador. A cada tipo de interacción le corresponde una patogenicidad distintiva.

Merece la pena subrayarse el sistema de secreción de tipo-III. En los tres genomas se encuentra el mismo locus que codifica dicho sistema. En *B. bronchiseptica* el locus en cuestión se halla intacto. En *B. parapertussis* existen dos pseudogenes; aunque el locus de *B. pertussis* parece inalte-

	B. bronchiseptica	*B. pertussis*	*B. parapertussis*
Tamaño (pares de bases)	5.338.400	4.086.186	4.773.551
Contenido de pares de guanina-citosina (%)	68,07	67,72	68,10
Secuencias codificantes	5007	3816	4404
Pseudogenes	18	358	220
Tamaño medio de los genes (pares de bases del ADN)	978	978	978
ARNr	3	3	3
ARNt	55	51	53
Elementos IS (secuencias de inserción en el ADN)	0	261	112

2. Característica generales de los tres genomas.

rado, el sistema de secreción tipo-III no se expresa.

Sabido es que los lipopolisacáridos son componentes de la membrana. Esas macromoléculas y su dominio distal de membrana, el antígeno O, revisten particular interés en las bacterias patógenas del tipo gramnegativas: de ellos se sirven para sortear las defensas inmunitarias del hospedador. El residuo de azúcar terminal del antígeno O varía incluso entre cepas de la misma especie. El locus responsable de la biosíntesis del antígeno O se halla intacto en *B. parapertussis* y en *B. bronchiseptica,* pero ha sido inactivado por un elemento de inserción en *B. pertussis*.

En relación con la movilidad, existen también diferencias entre las tres especies de *Bordetella*. *B. bronchiseptica* es móvil: en su genoma existe un operón completo para las biosíntesis de flagelos. Sin embargo, en *B. pertussis* y en *B. parapertussis* este operón ha sido inactivado por la inserción de varios pseudogenes y elementos de inserción (*véase la figura 1*). Se ha relacionado tal discrepancia entre las especies bacterianas con la capacidad que tiene *B. bronchiseptica* de sobrevivir en una fase ambiental inviable para las otras dos. La falta de movilidad y la alta virulencia de *B. pertussis y B. parapertussis*, comparada con la manifestada por *B. bronchiseptica*, explica su dependencia estricta del hospedador, y también la transmisión directa de hospedador a hospedador.

En coherencia con su evolución genómica independiente, *B. pertussis* posee factores de virulencia distintos de los que presenta *B. parapertussis*. Una y otra especie parecen contar con mecanismos de interacción intensa con el hospedador que no se deben a una adquisición reciente de ADN. Sabido es que en otras muchas bacterias patógenas, el ADN que codifica factores de virulencia se ha podido recibir por transferencia horizontal de unas bacterias a otras. La intensificación aludida podría deberse a la reducción a gran escala del número de genes, ya sea por pérdida o inactivación de los mismos.

ANA M. CERDEÑO TÁRRAGA,
MOHAMMED SEBAIHIA
y JULIAN PARKHILL
Unidad de Secuenciación de Patógenos
Instituto Wellcome Trust Sanger,
Hinxton, Cambridge (U.K.)

Química selectiva

Manipulación de la materia a escala atómica

Una reacción química implica la transformación de una o varias moléculas reactantes en una o varias estructuras nuevas, los productos. Para que ello ocurra, el sistema químico debe superar una barrera de energía de activación. Para obtener los productos, pues, debemos aportar energía a los reactantes.

La química tradicional induce las reacciones mediante el bombeo de calor. Pero la energía térmica ofrece una excitación "tosca"; hace vibrar todos los átomos de la molécula, de forma que tienen lugar sólo los procesos más probables: rotura de los enlaces más débiles —no los más fuertes— y formación de las estructuras que dicta la naturaleza.

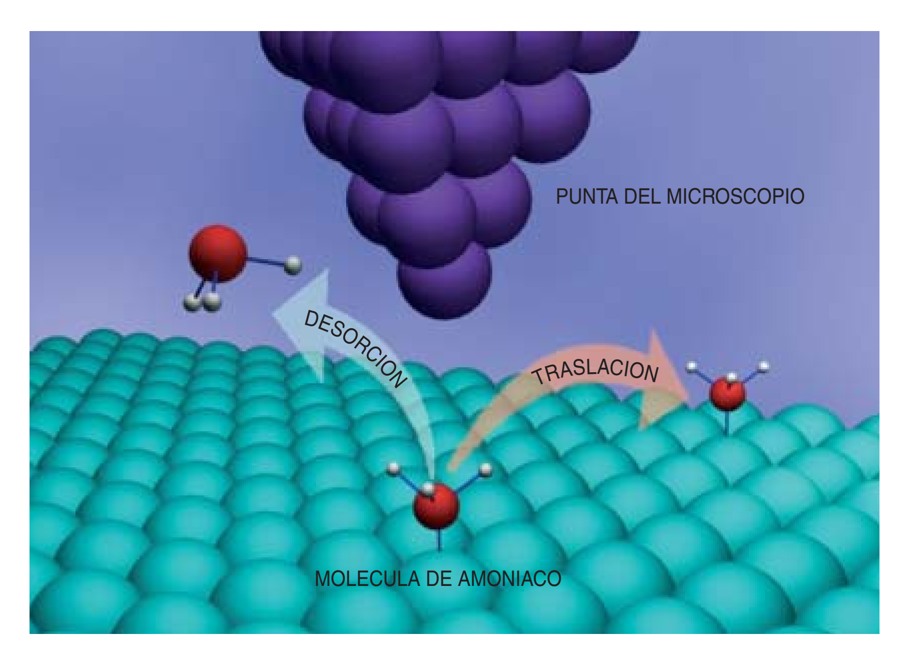
La química moderna, en cambio, busca controlar el curso de las reacciones para obtener procesos distintos de los más "favorables". Se trata de una química *selectiva*. Requiere concentrar la energía de activación sólo en una parte de la molécula reactante y durante el tiempo suficiente para inducir la transformación química deseada. En este caso, pues, la activación de tipo térmica no sirve; es demasiado "grosera". Se recurre a un método de excitación más fino: el envío de partículas, fotones o electrones, con la energía necesaria para activar la reacción.

La microscopía de efecto túnel (STM, de "scanning tunnelling microscopy") permite visualizar, con resolución atómica, la superficie de los materiales. Desde su invención, hace casi cinco lustros, ha revolucionado los conocimientos sobre la física y la química de superficies, permitiendo la caracterización de la estructura atómica de superficies limpias y la localización exacta de moléculas depositadas en ellas. Durante el último decenio se ha aplicado también a la manipulación individual de átomos y moléculas, para la construcción de nanoestructuras. En este caso, el STM necesita operar en condiciones extremas de presión (ultraalto vacío) y temperatura (268 ºC bajo cero).

El microscopio de efecto túnel halla aplicación también en la química selectiva. En fecha reciente, se ha utilizado en el estudio del comportamiento químico de una sola molécula aislada sobre una superficie. Ello ha sido posible porque el STM permite inyectar en una molécula electrones de forma controlada. Cuando los electrones emitidos interaccionan con un átomo o una molécula, le ceden su energía, excitando la vibración de algunos de los átomos que la forman. La molécula excitada (reactante) acumula suficiente energía para que tenga lugar una reacción química. Los primeros trabajos con STM han demostrado que, en función de la vibración excitada, el reactante se relaja (reacciona) siguiendo uno de varios caminos; cada uno lleva a un resultado (producto) distinto. Así pues, mediante el control de la energía y la frecuencia de la excitación es posible conducir la molécula reactante por un camino u otro y, por tanto, controlar el curso de la reacción química.

El grupo que dirige W. Ho, de la Universidad de California, ha demostrado que la excitación de la vibración del enlace que une los dos átomos de una molécula de oxígeno (O_2) induce la rotación de la misma; en cambio, el aumento de la velocidad de excitación (número de excitaciones por unidad de tiempo) produce una acumulación de energía tal, que provoca la disociación de la molécula. Por ahora, esta técnica se utiliza sólo para resolver cuestiones fundamentales. En este ejemplo, y en otros que le siguen, el interés científico radica en comprender cómo la energía se acumula en la molécula y se transfiere luego de una vibración a una rotación.

En 2003, en un trabajo internacional dirigido, entre otros, por el autor, se consiguió controlar una reacción química en una sola molécula mediante la aplicación de impulsos eléctricos con un microscopio de efecto túnel. En el proyecto colaboraron expertos del Instituto de Ciencia de los Materiales de Barcelona (CSIC), la



La microscopía de efecto túnel permite controlar de forma selectiva la evolución de una molécula de amoníaco (NH_3) depositada sobre una superficie de cobre. En función del tipo de vibración inducida (que, a su vez, depende de la energía de los electrones inyectados), se produce la traslación o la desorción de la molécula.

Universidad francesa Paul Sabatier, el Instituto berlinés Fritz-Haber y el estadounidense Laboratorio Nacional Brookhaven. El experimento se realizó con una molécula de amoníaco (NH_3, un átomo de nitrógeno rodeado por tres átomos de hidrógeno) depositada sobre una superficie de cobre (Cu), con la que forma un enlace químico. La reacción que pretendía controlarse era la rotura de dicho enlace.

El ajuste de la energía de los electrones que se inyectan en la molécula de amoníaco permite activar de forma selectiva la vibración de un enlace, aumentando la probabilidad de inducir una reacción química determinada. Los electrones más energéticos provocan que los átomos de hidrógeno se acerquen al de nitrógeno en un movimiento análogo al de compresión-estiramiento de un muelle. Esta excitación del enlace N-H termina en la rotura del enlace N-Cu, que ancla la molécula en la superficie, y, por tanto, en el traslado de ésta a una posición cercana. La energía de vibración se transforma, pues, en energía de traslación.

Los electrones con una energía ligeramente inferior, en cambio, hacen que los átomos de hidrógeno se desplacen alrededor del átomo de nitrógeno en un movimiento similar al de apertura y cierre de un paraguas (de hecho, esta vibración se denomina "umbrella", paraguas en inglés). Lo mismo que un golpe de viento, esta excitación provoca la inversión de la estructura de la molécula y ulterior desorción.

En ambos casos, la reacción consiste en la rotura de un enlace químico, pero el resultado final —traslación o desorción de la molécula— depende del tipo de vibración inducida en sus átomos. Este experimento demuestra que podemos controlar de forma selectiva una reacción química en una sola molécula mediante la aplicación de una interacción eléctrica.

Cabe mencionar que este sistema fue ampliamente estudiado en experimentos fotoquímicos durante los años noventa del siglo pasado. Sin embargo, no llegó a detectarse dicha selectividad en el movimiento de la molécula de NH_3. Por un lado, la sensibilidad de la técnica empleada se quedó a dos órdenes de magnitud de la sensibilidad requerida; por otro, los procesos de difusión se detectan sólo mediante MET.

Las aplicaciones del MET se han extendido también a sistemas de mayor complejidad. En 2002, el grupo de K. H. Rieder, de la Universidad Libre de Berlín, acometió paso a paso la obtención de una molécula de dibenceno a partir de dos moléculas de yodobenceno (reacción de Ullmann). En primer lugar, se excita el enlace que une el átomo de yodo con el anillo benzoico para provocar la rotura de dicho enlace. A continuación, la punta del microscopio arrastra dos anillos benzoicos, desprendidos de su correspondiente átomo de yodo, hasta encararlos. En una tercera etapa, la inyección de electrones excita el sistema hasta provocar la formación de un nuevo enlace entre los anillos y obtener, por fin, una molécula de dibenceno.

Esta novedosa metodología permite manipular la materia a escala atómica, uno de los objetivos principales de la nanotecnología. Su aplicación a otros sistemas moleculares facilitará el desarrollo de métodos de inducción y control de reacciones de mayor complejidad. Las conclusiones que se obtengan a escala nanoscópica se aplicarán al diseño de nuevas estrategias macroscópicas de manipulación de reacciones catalíticas mediante luz (fotones), electricidad (electrones), o ambas, que permitan incrementar la efectividad de las reacciones conocidas, así como sintetizar nuevos productos químicos, imposibles de obtener mediante la química clásica "térmica".

José Ignacio Pascual
Universidad Libre de Berlín,
Alemania

Amenaza contra la radioastronomía

Teléfonos celulares

Sólo una parte minúscula del espectro electromagnético está reservada a la radioastronomía. Son pequeños dominios de frecuencia, centrados en las líneas espectrales más importantes para la astrofísica. Hablamos de líneas emitidas por átomos (de hidrógeno sobre todo, como la correspondiente a los 21 cm de longitud de onda) o moléculas en las gigantescas nubes interestelares, en envolturas de gas de las estrellas

viejas o en galaxias distantes. Aparecen con frecuencias determinadas y bien conocidas. Su contribución al conocimiento del universo en los últimos años ha sido fundamental.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) adjudica y controla los dominios de frecuencia del espectro de radio utilizados comercialmente. Los intereses de la radioastronomía en la ITU están representados por una organización llamada IUCAF, en la que trabajan diferentes comités nacionales.

Algunas de las bandas de frecuencia utilizadas por los teléfonos celulares caen entre los 800 y los 900 megahertz (MHz). Pero éstos emiten no sólo en las frecuencias para las que han sido concebidos, sino también en los múltiplos enteros de esas frecuencias fundamentales, o armónicos, como los que determinan el timbre de un instrumento musical. Los primeros armónicos de una fundamental de 800 MHz son, por tanto, las frecuencias de 1600 y 2400 MHz.

Basta con que caiga una pequeña parte de esta radiación artificial en las bandas protegidas para que se resientan las observaciones astronómicas. Las ondas de radio extraterrestres llegan a la Tierra muy debilitadas, ya que los objetos que las emiten están muy alejados. La distancia entre los emisores de ondas de radio artificiales y los observatorios se encuentra entre unos pocos kilómetros y 37.000 (la distancia de los satélites de comunicaciones geoestacionarios a la superficie terrestre). Los objetos más distantes del universo de los que podemos recibir radiación de radio se hallan a miles de millones de años luz.

La intensidad de la radiación disminuye con el cuadrado de la distancia. Un teléfono celular situado en la Luna, a casi 400.000 kilómetros de distancia, sería una de las fuentes de radio más intensas del firmamento. Los teléfonos utilizados en los aviones constituyen un problema especialmente grave, ya que vistos desde los radiotelescopios se encuentran en la dirección de fuentes astronómicas. Valga un ejemplo numérico: la intensidad de la radiación de siete teléfonos celulares que operasen al mismo tiempo en cada uno de diez aviones en vuelo, visibles desde un radiotelescopio, sería 25.000 veces mayor que lo permitido por la ITU en las frecuencias de la banda protegida en torno de la línea del radical hidroxilo (OH). Se está pensando en autorizar dentro de un avión el funcionamiento simultáneo de siete teléfonos móviles, como máximo.



El radiotelescopio de 100 metros del Instituto Max Planck de Radioastronomía en Effelsberg. La medición de los campos magnéticos interestelares a partir de las líneas espectrales de la molécula de OH constituye un objetivo importante de la investigación actual. El uso de teléfonos celulares en los aviones puede interferir en las regiones del espectro pertinentes.

El "Sistema Global para las Comunicaciones Móviles", GSM, es la norma que rige los teléfonos celulares. Una de las bandas del GSM está entre 824,2 y 848,8 MHz. Los armónicos caen, por tanto, entre 1648 y 1698 MHz . Se superponen al dominio de dos de las más importantes líneas radioastronómicas, las de 1665,4 y 1667,4 MHz; las emiten las moléculas de hidroxilo de las nubes interestelares. Las observaciones de esas líneas espectrales aportan mucha información sobre las regiones donde nacen nuevas estrellas, y no sólo en nuestra Vía Láctea, sino también en galaxias lejanas. Tales observaciones de esas líneas representan una de las pocas posibilidades de medir directamente los campos magnéticos interestelares a través del efecto Zeeman.

El efecto Zeeman describe el desdoblamiento de las líneas espectrales en un campo magnético. Así, por ejemplo, el campo magnético de la región HII ultracompacta W3(OH) origina un desdoblamiento de la línea espectral a 1665 MHz del OH. El desdoblamiento de la línea espectral es proporcional a la intensidad del campo magnético. La emisión OH está reforzada por el efecto máser: emisión estimulada de radiación de microondas, análoga a esa misma forma de emisión para la luz en los láseres. Las regiones máser muy compactas se pueden cartografiar mediante interferometría de base muy larga (el uso conjunto de varios radiotelescopios muy separados). El campo magnético en estas densas regiones circunestelares es 100 veces más intenso que en las nubes interestelares, abundantes aunque menos densas. Los campos magnéticos se intensifican con el colapso de una nube gaseosa, puesto que entonces aumenta la densidad.

—Karl Menten

La granada

Bioquímica nutricional

En los últimos años, los estudios epidemiológicos han demostrado que existe relación entre dieta y salud. Con ello, los alimentos se han convertido en una rama directa de la medicina preventiva. Las frutas, hortalizas y productos derivados presentan efectos beneficiosos, asociados a la prevención de enfermedades cardiovasculares y distintos tipos de cáncer. Un fruto, de consumo limitado aunque fuente importante de compuestos bioactivos con efectos beneficiosos para la salud, es la granada (*Punica granatum* L.).

Originario de Oriente próximo, el cultivo del granado se fue extendiendo por la cuenca mediterránea. De su fruto habla Plinio en su *Historia Natural*. Los españoles lo llevaron al Nuevo Mundo. Hoy día, las granadas más apreciadas son las del sudeste español, por su magnífico sabor y color rojo rubí. Consideradas símbolo del amor y la fecundidad en Oriente, griegos y árabes la empleaban con fines terapéuticos y en la India se ha usado tradicionalmente para la conservación de alimentos. Hoy su consumo se vincula con la disminución del riesgo de padecer diversas enfermedades, amén de desarrollar una acción antiséptica y desinfectante frente a *B. subtilis, E. coli* y *S. cerevisiae*.

Según una reciente investigación israelí, el consumo de un vaso diario de zumo de granada reduce el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Según parece, el zumo inhibe la actividad de la enzima convertidora de angiotensina. Con ello, reduce la presión arterial, disminuye la oxidación del colesterol de baja densidad y recorta el grosor de la capa íntima de la carótida común en pacientes con estenosis en la arteria. En la Universidad de Wisconsin han conseguido retardar el crecimiento tumoral del cáncer de próstata, inducido en ratones, mediante la inclusión de este zumo en la dieta.

Otros investigadores han observado que el concentrado de granada mejora el perfil lipídico de pacientes diabéticos y que los extractos de granada alivian los síntomas posmenopáusicos en ratones ovariectomizados. Se ha llegado incluso a sugerir el empleo del zumo para tratar el sida: constituye una de las nueve especies recogidas en una receta japonesa patentada con ese fin.



La granada es rica en compuestos con una gran actividad antioxidante.

Pese a todo, no se ha podido todavía individualizar los compuestos responsables de tales posibles beneficios, ni desentrañar sus mecanismos de acción.

La granada, pobre en sodio, es rica en potasio y aporta cantidades considerables de calcio, magnesio, fósforo y hierro. Contiene, además, vitaminas del grupo B, C y niacina, en concentraciones similares a las ciruelas o las manzanas. Presenta una pequeña proporción de fibra alimenticia, localizada en el piñón. Está compuesta mayoritariamente por agua e hidratos de carbono, siendo menor su contenido en grasas y proteínas, por lo que tiene un bajo valor calórico (unas 75 kilocalorías por 100 gramos de porción comestible). No obstante, el papel protector frente a las enfermedades se atribuye, fundamentalmente, a las sustancias fenólicas (componentes fitoquímicos). En la granada abundan elagitaninos, galotaninos y antocianos (responsables de su atractiva coloración), así como ácido elágico; compuestos, todos ellos, con una extraordinaria actividad antioxidante.

La investigación *in vitro* acometida en nuestro laboratorio ha puesto de manifiesto que el zumo de granada es uno de los alimentos con mayor capacidad antioxidante descrita hasta la fecha, superior a la del té verde o el vino tinto. Esta actividad se debe a su alta concentración de elagitaninos (polifenoles) —concretamente la punicalagina, responsable del 50 % de la actividad—, otros taninos hidrolizables (33 % de la actividad total), antocianos (10 %) y ácido elágico (aproximadamente el 3 %).

¿Qué les ocurre a estos metabolitos, una vez son ingeridos? Para contestar a esta pregunta emprendimos varios ensayos *in vitro*, que nos demostraron que, tras el paso por el tracto gastrointestinal, un 95 % de los antocianos y de la vitamina C se degradaba, mientras que un 30 % de los otros polifenoles se mantenía inalterado, al tiempo que la capacidad antioxidante de los extractos digeridos era directamente proporcional a la composición fenólica total. Al menos en teoría, pues los compuestos fenólicos intactos y algunos

de sus metabolitos de degradación persistían en su actividad.

Posteriormente, se comprobó que, tras incluir punicalagina en la ingesta diaria de ratas, se excretaba en heces y orina un 3-6 %, intacto o en productos hidrolizables; un 5-10 % estaba presente en el plasma, junto con derivados del ácido elágico. De ello se desprendía que la mayor parte de los elagitaninos debían transformarse en metabolitos no detectables o acumularse en otros tejidos no analizados. Ahora la investigación realizada sobre individuos sanos comprobó que la punicalagina era metabolizada por la microflora del colon. La punicalagina se degradaba en compuestos biodisponibles pero de baja actividad antioxidante. No se detectaron ni ácido elágico ni punicalagina en plasma u orina.

En otras investigaciones complementarias, desarrolladas en la Universidad de California, se puso de manifiesto que, tras la ingesta de 180 mililitros de zumo de granada, con una concentración de 25 mg de ácido elágico y 318 mg de elagitaninos, aparecían en plasma 31,9 nanogramos de ácido elágico/mililitro, pasada una hora, para desaparecer cuatro horas más tarde.

De los resultados anteriores se pueden extraer varias conclusiones. Los compuestos fenólicos intactos no parecen ser los responsables directos de las propiedades beneficiosas para la salud que se atribuyen a la granada. En cambio, sí podrían cumplir esa misión benefactora los metabolitos de degradación de los compuestos fenólicos. Cabría también que intervinieran los propios compuestos fenólicos intactos; ahora bien, no porque capten radicales libres, sino por una interacción con proteínas que generen metabolitos con actividad antioxidante. Por último, pudiera acontecer que el efecto antioxidante consista en una protección frente a otros agentes (como los antibióticos) o en reacciones con otros compuestos potenciadores de actividades negativas para el organismo.

Cristina García Viguera
Laboratorio de Fitoquímica
Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos
CEBAS/CSIC
Murcia

Dhugal Lindsay

Planeta de medusas

Pescadores y científicos vienen tomando muestras del mar profundo desde la segunda mitad del siglo XIX con redes y sondas de todo tipo. Lo extraído inducía a pensar que peces, camarones, copépodos y otros crustáceos minúsculos dominaban la fauna profunda oceánica. Pero con el advenimiento de los sumergibles nuestra comprensión de los ecosistemas oceánicos se ha transformado: a través de las ventanas de esas naves se observan, sobre todo, medusas y otros organismos gelatinosos.

En el proceso de recolección, las redes rompen muchos de esos animales frágiles que medran en el océano. Buena parte del resto se destruye en la fijación con formalina, que se aplica a las muestras de plancton. Sin embargo, la enorme abundancia de ctenóforos, medusas y otros animales gelatinosos nos habla de una vida finamente adaptada a unas profundidades estables y oscuras, donde el alimento escasea.

Para conocer su comportamiento hemos de observarlos *in situ* o registrarlos con las cámaras fotográficas y de vídeo. Luego, capturados con aparatos especiales que equipan el sumergible y transportados a bordo, se examinan los especímenes vivos, se estudia su morfología y se realizan experimentos.

Estos seres gelatinosos ocupan un lugar destacado en las redes tróficas mesopelágicas. Constituyen también un sustrato esencial para la vida de otros organismos. El sifonóforo *Praya*, que alcanza cuarenta metros de largo, amén de ser un depredador voraz, protege a juveniles de peces, anfípodos y otros animales. Algunas medusas se alimentan en exclusiva de animales gelatinosos; otras se especializan en la depredación de peces.

El estudio de estos organismos resulta difícil y costoso. Ahora bien, reconocida su importancia en los ecosistemas oceánicos profundos y admitido que nos hallamos ante una de las mayores biomasas en nuestros océanos, su interés resulta obvio.



1. El sumergible japonés Shinkai 6500 es, en la actualidad, el que alcanza profundidades mayores.

2. Medusa del género *Solmissus*. Se alimenta sólo de otros animales gelatinosos. En su cuerpo se alojan anfípodos.

3. Ctenóforo del género *Kiyohimea*. Alcanza hasta 50 centímetros de longitud. ("kiyohimea" significa "princesa pura" en japonés.)



4. Medusa del género *Aequorea* con su anfípodo comensal del género *Oxycephalus*.



5. *Tottonia contorta*. Los gastrozoides de este sifonóforo se observan en color rojizo.

FOTOGRAFIAS PUBLICADAS CON PERMISO DE JAMSTEC

Plantas y cambio climático

Los gases de invernadero constituyen una amenaza contra la integridad de la biosfera. Para hacer frente a ese reto, se cuenta con dos complejos enzimáticos de la fotosíntesis

Juan B. Arellano y Javier De Las Rivas

En el transcurso del siglo XX, la temperatura media sobre la superficie de la Tierra aumentó 0,6 ± 0,2 grados Celsius, el nivel del mar subió entre 10 y 20 centímetros, la energía térmica almacenada en sus aguas se incrementó, algunas superficies terrestres o marinas cubiertas por nieve o hielo retrocedieron un 10 por ciento o perdieron hasta el 40 por ciento de su espesor y el perfil de precipitaciones atmosféricas en varias zonas del planeta cambió. Se observó un aumento de la intensidad y frecuencia de fenómenos climáticos extremos como El Niño, monzones y sequías.

Las causas de esas modificaciones se reparten entre las que son debidas a la acción del hombre y las que se deben a agentes naturales. Entre las segundas se inscriben variaciones sutiles de la radiación solar y cambios producidos por la actividad volcánica. Entre los antropogénicos destacan los gases y los aerosoles derivados de la combustión de residuos fósiles.

De la radiación solar incidente sobre la Tierra, parte se refleja. Pero no toda la reflejada llega al medio exterior; una fracción queda atrapada en la atmósfera, absorbida por las moléculas de agua y dióxido de carbono (CO_2). En virtud de ello, la temperatura terrestre supera en unos 33 ºC la de una hipotética Tierra sin atmósfera. Este fenómeno, el efecto invernadero natural, sustenta la vida en nuestro planeta.

La suma de todas las perturbaciones exógenas regula el enfriamiento o calentamiento de la Tierra. La perturbación que produce cada uno de los factores externos se mide en watt por metro cuadrado ($W \times m^{-2}$). Esa perturbación del balance energético entre la radiación incidente y la reflejada puede ser positiva o negativa; según se trate de una u otra, la fracción de la radiación infrarroja atrapada en la atmósfera aumentará o disminuirá.

Perturbaciones antropogénicas

Desde 1750, la concentración atmosférica de CO_2 ha aumentado un 31 por ciento. Su valor actual se cifra en torno a 350 partes por millón. Otros gases de efecto invernadero, así halocarburos y metano entre ellos, han aumentado sus respectivas concentraciones atmosféricas. Desde 1750, la perturbación debida al conjunto de los gases de invernadero se sitúa en torno a 2,40 $W \times m^{-2}$. De ese valor, corresponde al CO_2 un 60 por ciento.

Particular interés reviste la alteración antropogénica de la concentración atmosférica de gas ozono (O_3). La emisión de halocarburos (CFC) ha provocado una reducción de la capa de O_3 en la estratosfera. Añádase a ello que la descomposición de compuestos precursores del O_3 —óxidos de nitrógeno (NO_x) o productos orgánicos volátiles producidos

por vehículos o industrias— ha provocado un aumento de la concentración de O_3 en la troposfera. La suma de estos dos efectos ha dado lugar a una perturbación exógena positiva (0,20 $W \times m^{-2}$), que ha contribuido ligeramente al efecto invernadero. Con todo, el incremento de la concentración de los CFC ha sido casi nulo desde 1995.

Amén de causar perturbaciones exógenas positivas y negativas, los aerosoles antropogénicos ejercen otros efectos indirectos sobre el clima. Lo que complica un análisis pormenorizado. Los sulfatos o los aerosoles procedentes de la combustión de residuos fósiles o de biomasa producen una perturbación negativa; además, alteran la formación de nubes y gotas de lluvia. Desconocemos todavía la intensidad de la perturbación global negativa resultante.

El hollín (procedente de la combustión del gasoil o carbón) y otros aerosoles absorben la radiación solar. Causan una perturbación positiva.

Además de la emisión de gases y aerosoles, se dan otros factores que contribuyen al aumento de la reflexión de la radiación solar: la deforestación y la desertización. El retroceso de los bosques y tierras de labor ante el avance de zonas cubiertas de nieve o áridas se traduce en una perturbación negativa.

Perturbaciones naturales

En lo que atañe a los agentes perturbadores exógenos naturales, desde 1750 la radiación solar ha producido una perturbación positiva moderada (0,3 $W \times m^{-2}$). Los ciclos solares de once años influyen también sobre el clima, pero aún no se conocen los detalles del proceso. Los aerosoles estratosféricos procedentes de la actividad volcánica generan perturbaciones negativas de corta duración que, en general, coinciden con períodos de erupciones volcánicas. En breve, durante la segunda mitad del siglo XX, los agentes naturales contribuyeron al cambio climático con una pequeña perturbación exógena negativa.

Hoy por hoy no podemos determinar la perturbación exógena total del planeta. Con otras palabras, no podemos obtener la suma aritmética de perturbaciones (positivas y negativas) correspondientes a los agentes exógenos, naturales y antropogénicos. Por dos razones principales: se desconoce el valor de varias perturbaciones exógenas y no existe uniformidad en los efectos. Con esta segunda razón queremos indicar que algunos agentes producen un efecto global sobre el cambio climático (pensemos en el CO_2) o local (los aerosoles).

En consecuencia, cabe sólo conjeturar con bastante aproximación, fiados en simulaciones teóricas, que la suma de todas las perturbaciones exógenas (naturales y antropogénicas) es positiva y que, por tanto, la Tierra está sufriendo un calentamiento. Según los modelos teóricos, el cambio climático observado durante los últimos 50 años resultaría, en buena medida, de la actividad antropogénica; la variabilidad interna del clima o los factores externos naturales tendrían, o habrían tenido, una influencia mínima.

El cambio climático causado por agentes antropogénicos se seguirá observando durante el siglo XXI. La emisión de CO_2, procedente sobre todo de la combustión de residuos fósiles, constituirá la principal perturbación exógena positiva. Se estima que la concentración atmosférica





1. LA DESERTIZACION (*arriba*) Y LA DEFORESTACION (*abajo*) contribuyen al aumento de la reflexión de la radiación solar. Producen, por tanto, una perturbación exógena negativa.



2. EL CO_2 QUE LOS AUTOMOVILES emiten a la atmósfera absorbe parte de la radiación solar, causando una perturbación exógena positiva.

MIGUEL ANGEL HERNANDEZ

de CO_2 alcanzará valores de entre 540 y 970 ppm a finales del siglo XXI, entre un 25 y un 180 por ciento por encima de sus valores actuales. La perturbación exógena positiva correspondiente causará un incremento de la temperatura sobre la superficie de la Tierra de entre 1,4 y 5,8 ºC.

Con el calentamiento global, subirá el nivel del mar entre 10 y 90 cm. Podrían incluso desaparecer las circulaciones termosalinas de los océanos. Se prevé también que la concentración del vapor de agua en la atmósfera aumente y, con ello, la probabilidad de precipitaciones atmosféricas. El perfil de precipitaciones de un año para otro y de unas regiones a otras sufrirá grandes variaciones, sucediéndose períodos de lluvia y sequía intensas. Todo ello repercutirá en los sistemas biológicos.

La primera en resentirse será la relación que existe entre el CO_2 y el O_2 atmosféricos y la actividad fotosintética de las plantas. Entre el CO_2 y el O_2 inorgánicos (gases atmosféricos) y el CO_2 y el O_2 orgánicos (metabolitos esenciales para los sistemas vivos) se da un equilibrio muy frágil. Cualquier modificación forzada del balance CO_2/O_2 atmosférico repercute directamente en la fotosíntesis. ¿Hasta qué punto podrán los organismos fotosintéticos amortiguar el impacto producido por el incremento de CO_2 atmosférico, agente principal del cambio climático?

Luz y dinámica de la biosfera

La luz constituye, en última instancia, la fuente de energía que sostiene la vida sobre la Tierra. La biosfera forma un sistema termodinámico cerrado: no intercambia materia con el exterior, aunque sí energía. Esta energía recibida del Sol resulta esencial para la dinámica geológica y, sobre todo, para la dinámica biológica del planeta. El Sol se comporta como un cuerpo negro cuyo espectro de emisión, que depende de la temperatura en superficie (6000 kelvin), es continuo y se extiende desde los 200 nanómetros (radiación ultravioleta) hasta los 1800 nanómetros (infrarrojo), pasando por la región del visible, donde el máximo de intensidad se sitúa en los 500 nm. A la luz, o radiación visible, cuya longitud de onda se mueve entre los 400 y 700 nanómetros, corresponde el 40 por ciento de la radiación solar incidente.

Mediante la fotosíntesis, un proceso universal y único a la vez, los organismos fotótrofos, o fotoergónicos, absorben y fijan una pequeña fracción de la energía solar que llega a la Tierra. La luz visible les sirve para realizar la fotosíntesis. Las radiaciones del infrarrojo y del ultravioleta les permiten obtener información del entorno. Merced a la capacidad para absorber y fijar la energía de la luz, los organismos fotótrofos se sitúan en la base de otros sistemas biológicos. Las plantas y sus antepasados han fundado y hecho posible el posterior desarrollo de otras formas de vida, incluido el reino animal. Su actividad fotosintética les permite asimilar carbono inorgánico, producir biomasa (carbono orgánico) y originar oxígeno, que liberan a la atmósfera.

El oxígeno atmosférico incrementó de forma drástica hace unos 2200 millones de años, fruto de la actividad de los primigenios organismos oxifototróficos, similares a las cianobacterias. La fotosíntesis fue primero anoxigénica, realizada por fotótrofos anoxigénicos en lechos sedimentarios de principios del período Arqueo. Se trataba de un proceso lento y de escasa producción de biomasa, dado que recibía poca luz y utilizaba, por fuente de electrones, compuestos reducidos poco abundantes (H_2S, H_2 o Fe^{2+}, entre otros).

La fotosíntesis oxigénica se desarrolló posteriormente, sobre todo en la superficie de los mares. Mejoró en rapidez y eficacia, para absorber mayor cantidad de luz y sacarle partido a un sustrato tan abundante como el agua. Este es el tipo de fotosíntesis que realizan los cloroplastos, orgánulos de las células vegetales que evolucionaron, por endosimbiosis, a partir de las primeras cianobacterias.

Fases fotosintéticas

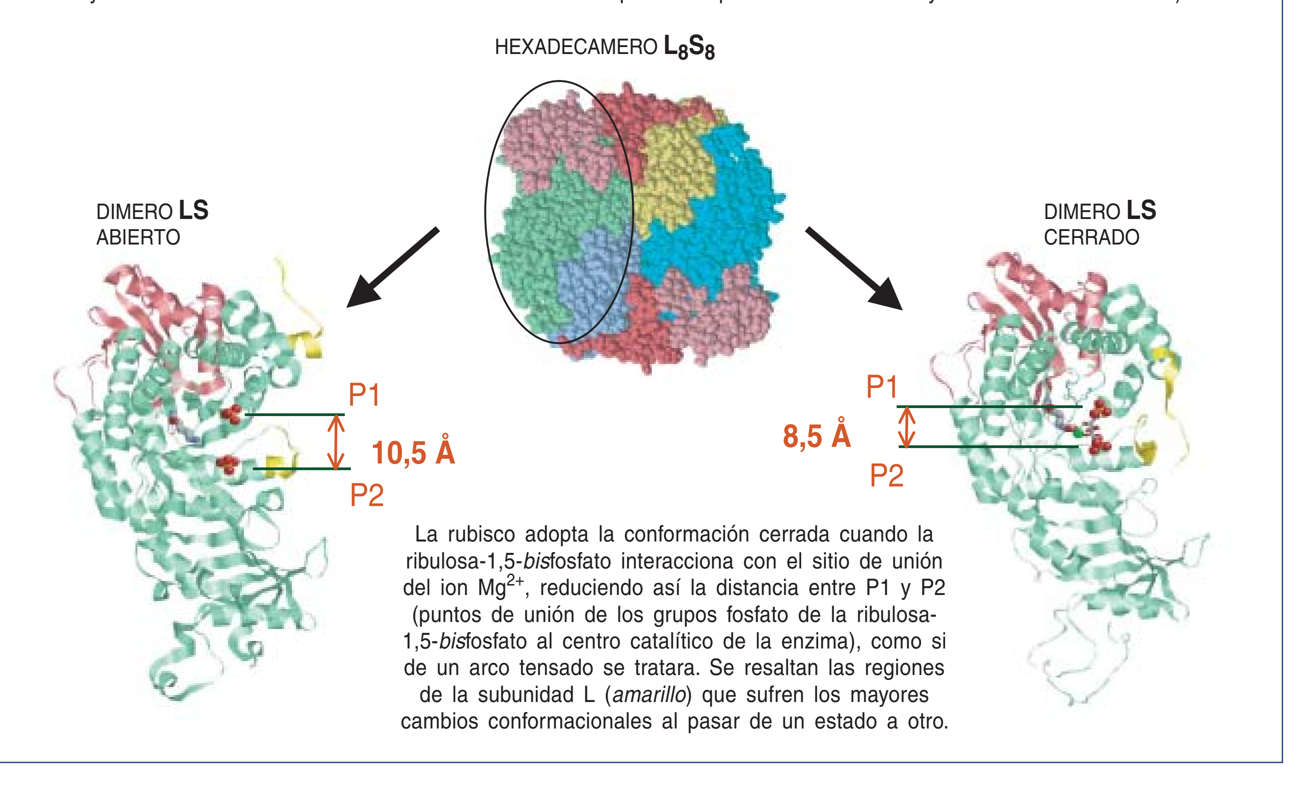
La fotosíntesis comprende una secuencia de procesos bioquímicos, que empiezan por los complejos de pigmentos y proteínas que operan a modo de antenas recolectoras y absorben la luz. Los fotones se canalizan, luego, hacia los centros de reacción de los fotosistemas, donde su energía se utiliza para crear un gradiente de electrones o cascada redox. Por último, mediante una serie de reacciones en cadena, se sintetizan nuevas biomoléculas necesarias para el mantenimiento de la planta y su crecimiento.

En la primera fase de esta cadena fotosintética se produce la transducción de energía luminosa en energía electroquímica. Tras esta “fase luminosa”, se asimilan los nutrientes inorgánicos, sobre todo el CO_2 atmosférico, que se incorporan a la materia orgánica celular. A esta segunda fase se la denomina “fase oscura”, pese a depender también de la luz, que regula la expresión y la actividad de varias de sus enzimas.

Las reacciones de la fase luminosa proporcionan moléculas de

ESTRUCTURA Y CONFORMACIONES DE LA RUBISCO

La molécula de la rubisco (ribulosa-1,5-*bis*fosfato carboxilasa/oxigenasa), corresponde a un hexadecámero (L_8S_8) que consta de dos subunidades (monómeros) distintas: una mayor (L, de 55 kDa, en *verde*), catalítica, y otra menor (S, de 15 kDa, en *rojo*), reguladora. El dímero LS puede adoptar dos conformaciones distintas: abierta-inactiva y cerrada-activa, que se diferencian en la accesibilidad al centro activo. En el estado conformacional cerrado (*derecha*) aparece unido al centro catalítico el 4'carboxi-D-arabinitol-1,5-*bis*fosfato, un inhibidor de la rubisco. (Las coordenadas atómicas se han obtenido de los ficheros 4RUB y 1EJ7 de la base de datos del *Protein Data Bank* depositadas por Paul M. G. Curmi y colaboradores en 2000.)



La rubisco adopta la conformación cerrada cuando la ribulosa-1,5-*bis*fosfato interacciona con el sitio de unión del ion Mg^{2+}, reduciendo así la distancia entre P1 y P2 (puntos de unión de los grupos fosfato de la ribulosa-1,5-*bis*fosfato al centro catalítico de la enzima), como si de un arco tensado se tratara. Se resaltan las regiones de la subunidad L (*amarillo*) que sufren los mayores cambios conformacionales al pasar de un estado a otro.

JUAN B. ARELLANO Y JAVIER DE LAS RIVAS

$NADPH^+$ y ATP. Estas fuentes de energía asimiladora aportan poder reductor ($NADPH^+$) y energía de enlace (ATP), necesarios para la segunda fase de asimilación y síntesis biomolecular. Dos son los complejos multienzimáticos claves para la realización y regulación de las dos etapas fotosintéticas: la rubisco (ribulosa-1,5-*bis*fosfato carboxilasa/oxigenasa), enzima encargada de la asimilación de carbono, y el fotosistema II (agua-quinona oxidorreductasa), que se ocupa de la fotooxidación del agua.

Rubisco

La rubisco constituye el punto clave del equilibrio entre el CO_2 atmosférico y el carbono biomolecular. El fotosistema II produce oxígeno (O_2), que se libera luego a la atmósfera. Se aprecia, pues, una conexión entre las fases geofísicas, inorgánicas, y las biológicas, orgánicas, del carbono y el oxígeno. La rubisco es sensible al O_2 y el fotosistema II lo es al CO_2.

La rubisco presenta una baja afinidad por el CO_2. Para mantener una tasa fotosintética adecuada, la planta debe sintetizar la enzima en abundancia: alrededor del 30 por ciento de la proteína total en hoja. En ambientes aeróbicos, la estructura de la rubisco corresponde a un hexadecámero (L_8S_8), que consta de dos subunidades (monómeros) distintas: una mayor (L), de 55 kilodalton y codificada en el cloroplasto, y otra menor (S), de 15 kDa y codificada en el núcleo. La función de la subunidad L es catalítica; la de la subunidad S reguladora. En la fijación del CO_2 intervienen dos cofactores: otra molécula de CO_2, que se une al grupo ε-amino de una lisina formando un carbamato, y un ion de magnesio (Mg^{2+}), que estabiliza dicho carbamato.

La enzima puede adoptar dos conformaciones: abierta o cerrada, que se distinguen en razón de su acceso al centro activo. Los cambios conformacionales están asociados con los tres sitios de unión de la molécula de ribulosa-1,5-*bis*fosfato al centro catalítico: P1, P2 (donde P hace referencia a los puntos de unión de los grupos fosfato de la ribulosa-1,5-*bis*fosfato) y el sitio de unión del ion Mg^{2+}. Para pasar de una estructura a la otra, la ribulosa-1,5-*bis*fosfato debe interaccionar con el sitio de unión del ion Mg^{2+}, reduciendo así la distancia entre P1 y P2. La interacción del sustrato con los tres sitios de unión provoca un cambio conformacional en varias regiones de la rubisco que resultan en el cierre de su centro activo. Durante la carboxilación de la ribulosa-1,5-*bis*fosfato, la enzima se mantiene en conformación cerrada.

Las reacciones de la fijación fotosintética de CO_2 fueron descubiertas por Melvin Calvin, Andrew A. Benson y James A. Bassham. Suminis-

traron, de forma controlada, dióxido de carbono marcado radiactivamente ($^{14}CO_2$) a un cultivo de *Chlorella pyrenoidosa* expuesto a la luz. Describieron la existencia de un ciclo fotosintético reductivo del carbono, denominado hoy en su honor ciclo de Calvin-Benson-Bassham. Consta éste de tres etapas: carboxilación, reducción del carbono y regeneración. La carboxilación corresponde al proceso catalizado por la rubisco. En la etapa de reducción se produce el aporte de energía en forma de ATP y $NADPH^+$, sintetizados en la membrana tilacoidal, para activar y reducir el 3-fosfoglicerato a gliceraldehído-3-fosfato. Por fin, a partir de las moléculas de gliceraldehído-3-fosfato (C_3) se produce la regeneración de la ribulosa-1,5-*bis*fosfato (C_5) en varias reacciones, una de las cuales consume ATP, cerrándose el ciclo. Una parte de las moléculas de gliceraldehído-3-fosfato se aprovecha para sintetizar almidón en el cloroplasto o sacarosa en el citosol, metabolitos esenciales para el desarrollo de la planta.

Calvin, Benson y Bassham observaron también que otras moléculas (glicolato, glicina y serina) y otros metabolitos quedaban marcados radiactivamente con ^{14}C, pese a no participar en el ciclo reductivo. Varios años después, William L. Ogren propuso una explicación: quizás el O_2 competía con el CO_2 como sustrato de la rubisco. Ello sugería que esta enzima no sólo podía catalizar la carboxilación de la ribulosa-1,5-*bis*fosfato, sino también su oxigenación. Andaba en lo cierto.

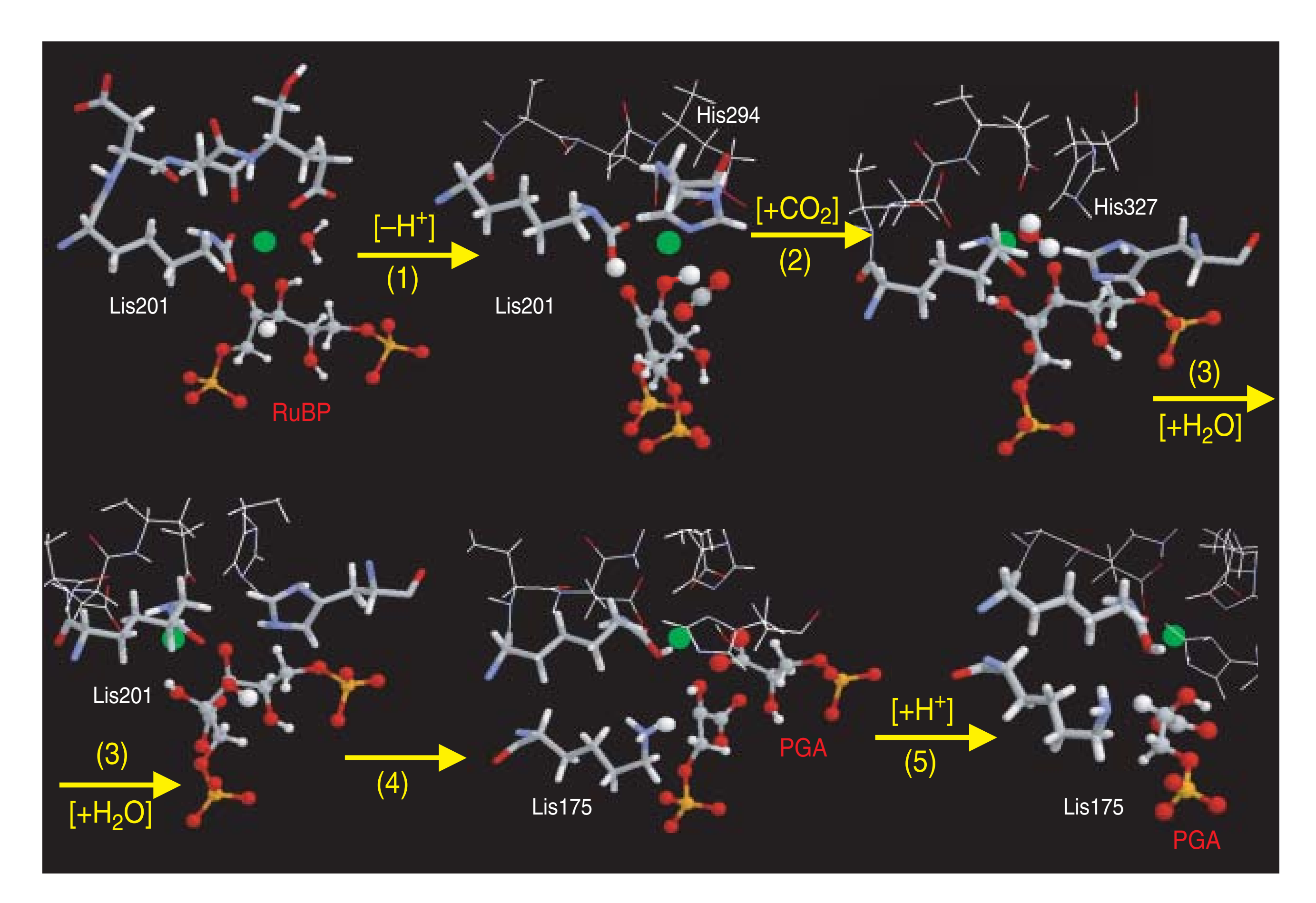
Los ciclos fotorreductivo (C3) y fotooxidativo (C2), aunque distintos, forman parte de un único metabolismo fotosintético del carbono. Ambos se encuentran en equilibrio dinámico y desarrollan una función reguladora-compensadora.

Fotosistema II

El fotosistema II corresponde a un complejo multienzimático. Cataliza la reacción fotoinducida de oxidación del agua y reducción de la plastoquinona. Se encuentra en todos los organismos oxifototróficos: plantas superiores, algas y cianobacterias. Se ocupa de dos procesos de especial significación para el conjunto de la fotosíntesis: la primera separación de carga y la fotólisis del agua. Mediante la separación de carga, fruto del aprovechamiento de la energía luminosa, se inicia el transporte electrónico a lo largo de la membrana tilacoidal. La fotólisis del agua aporta: electrones, que mantienen el

3. CICLO DE Fotólisis DEL AGUA. El subíndice de *S* (símbolo del estado del sistema) indica el número de equivalentes de oxidación almacenados (o número de electrones que las dos moléculas de agua pierden progresivamente); refleja el cambio del estado redox que sufre el sistema por cada cuanto de luz (hν) que el P_{680} absorbe. Al pasar de S_4 a S_0 se desprende una molécula de O_2 y se incorporan dos nuevas moléculas de H_2O, que inician otro ciclo. S_2^* corresponde a un estado intermedio en el que se produce una reorganización en el complejo de iones de Mn: el ion Cl^- pasa de estar enlazado con el ion Ca^{2+} a formar un nuevo enlace con un ion Mn. El residuo de tirosina Z de la proteína D1 opera como un componente redox intermedio entre el pigmento especial P_{680} y el centro de manganeso, aceptando átomos de hidrógeno de las moléculas de H_2O y donando electrones y protones al P_{680} y a un residuo de histidina, respectivamente.

TOMMOS ET AL. EN *CURRENT OPINION IN CHEMICAL BIOLOGY*, N.º 2, PAGS. 244-252; 1998



4. FIJACION DEL CO_2 EN LA RUBISCO en cinco etapas. (*1*) Enolización: se forma un enediolato intermedio de ribulosa-1,5-*bis*fosfato (RuBP), que puede interaccionar con una molécula de CO_2 o con una molécula de O_2. (*2*) Carboxilación: el enediolato interacciona con CO_2 para formar 3-ceto-2-carboxi arabinitol-1,5-*bis*fosfato. (*3*) Hidratación. (*4*) Escisión: el carbono 3, que forma parte de un grupo carboxilo, se escinde del carbono 2 para ganar estabilidad. Se forma la primera molécula de 3-fosfoglicerato (PGA). (*5*) Protonación: el carbanión C_2 acepta un protón (H^+) y se forma la segunda molécula de PGA.

JUAN B. ARELLANO Y JAVIER DE LAS RIVAS

transporte electrónico; protones, que originan un gradiente protónico a través de dicha membrana, y oxígeno molecular, producto residual que se libera a la atmósfera.

En los años ochenta del siglo pasado, Johann Deisenhofer, Robert Huber y Hartmut Michel dilucidaron, mediante difracción de rayos X, la estructura molecular del centro de reacción fotosintético de *Rhodopseudomonas viridis*, una bacteria roja. Este trabajo supuso un gran avance para el conocimiento de la fotosíntesis. Describía la homología que existe entre el centro activo de bacterias rojas y los polipéptidos centrales D1 y D2 del fotosistema II, propio de los organismos oxifototróficos. Estos dos polipéptidos unen todos los cofactores redox necesarios para transformar la energía luminosa en energía electroquímica.

Sin embargo, existe una notable diferencia entre este centro de reacción fotosintético de plantas, capaz de oxidar agua, y el de dichas bacterias, que utilizan moléculas que requieren menor poder oxidativo como H_2S, H_2 o Fe^{2+}. Desde el punto de vista evolutivo, resulta evidente que el uso de agua como sustrato primero de la fotosíntesis ofrece grandes ventajas.

En cuanto a la estructura, el fotosistema II consta de unas 25 proteínas denominadas PsbA-Z. De ellas, 17 corresponden a proteínas intrínsecas de membrana. Las proteínas centrales D1 y D2, de 30 a 32 kDa, contienen los cofactores redox implicados en la oxidación del H_2O y reducción de la plastoquinona. Intimamente asociadas a ellas se encuentran un grupo de proteínas de bajo peso molecular que no se unen a clorofilas. Otras unen específicamente a clorofilas y constituyen las antenas intrínsecas del fotosistema II. En las plantas encontramos, además, otros complejos mayores y menores de antena denominados Lhcb1-6.

Asociadas al fotosistema II de plantas, en el lado del lumen, se distinguen tres proteínas extrínsecas de membrana (PsbO, PsbP y PsbQ), que participan en la fotólisis del agua y en la producción de oxígeno. El centro activo del proceso fotolítico incluye 4 iones de manganeso. A ese centro se asocian los cofactores Ca^{2+}, Cl^- y HCO_3^-. El mecanismo de fotólisis del agua opera como un motor cíclico de 4 tiempos que arranca 4 electrones y 4 protones a 2 moléculas de agua, y desprende oxígeno molecular.

Fotorrespiración y fotoinhibición

Los organismos fotosintéticos necesitan rubisco y fotosistema II en cuantía notable. Dada la cantidad de masa vegetal en la Tierra, se estima que la rubisco constituye la enzima

más abundante y el fotosistema II el más sintetizado. Además, pueden funcionar en sentido reverso o inhibitorio cuando las condiciones ecofisiológicas lo requieren. Por un lado, la rubisco es capaz de catalizar la oxigenación, una actividad inhibitoria de la fijación de CO_2 que constituye el primer paso en el proceso de fotorrespiración. Por otro lado, debido a la extraordinaria inversión en energía que realiza para oxidar agua y desprender oxígeno, el fotosistema II sufre frecuentes alteraciones que conducen a su bloqueo o fotoinhibición reversible.

Durante largo tiempo se creyó que la fotorrespiración y la fotoinhibición provocaban en la planta una disminución de la actividad fotosintética. Se las supuso, incluso, vías metabólicas residuales, ineficaces o inútiles. Pero la investigación terminó por poner de manifiesto que estas funciones, en apariencia contrarias a la actividad fotosintética, constituyen mecanismos de regulación claves para el funcionamiento cabal de la fotosíntesis. La supresión de estos procesos mediante manipulación genética produce desequilibrios en la planta.

La fotorrespiración ofrece una vía alternativa que opera como sumidero de energía o de poder reductor. Consume O_2, ATP y $NADPH^+$ en el cloroplasto y evita su acumulación. La actividad oxigenasa de la rubisco impide que el O_2 disuelto en el cloroplasto interaccione con moléculas de clorofila en estado excitado o actúe como aceptor electrónico del fotosistema I (reacción de Mehler), procesos que darían lugar a la formación de especies activas de O_2. Existe otro mecanismo de protección, que contribuye a la actividad oxigenasa de la rubisco: el ciclo Halliwell-Asada o ciclo agua-agua del cloroplasto. En éste, ciertas enzimas consumen, además de $NADPH^+$, una especie activa del oxígeno producida en la reacción de Mehler.

La fotorrespiración constituye un proceso bioquímico que disminuye la eficiencia fotosintética, puesto que no conlleva una fijación neta del CO_2. Como compensación, ofrece a la planta un eficaz mecanismo de fotoprotección en condiciones adversas. En consecuencia, la rubisco, enzima sumidero de CO_2 u O_2, garantiza un consumo ininterrumpido de $NADPH^+$ y ATP, ya sea mediante el ciclo fotorreductivo del carbono o mediante el fotooxidativo.

La fotoinhibición reversible constituye una interrupción controlada del fotosistema II. Su actividad depende de los niveles de luz y de producción de oxígeno. El oxígeno desprendido en la fotólisis del agua puede resultar tóxico, si degenera en radicales oxidantes. El fotosistema II y la fisiología de los vegetales controlan y se protegen de esta adversidad mediante varios mecanismos clave. El fotosistema II constituye el centro fotosensible y oxisensible de mayor importancia fotosintética; esta sensibilidad permite a las plantas controlar la activación o desactivación del proceso que transforma la energía luminosa en electroquímica.

Cuando la intensidad de luz sobrepasa la capacidad de absorción y las necesidades de ATP y $NADPH^+$, entran en funcionamiento, en el fotosistema II, una serie de mecanismos de desacoplamiento y desactivación, que maximizan la disipación de la energía absorbida y minimizan el daño global en el aparato fotosintético, protegiendo la planta de un daño irreversible.

Entre los mecanismos implicados se cuenta la fosforilación de la antena extrínseca LHC II y su desconexión del fotosistema II (que resulta en una distribución más equitativa de la energía absorbida entre los fotosistemas II y I de la membrana tilacoidal). Interviene también el ciclo de las xantofilas, durante cuyo desarrollo las moléculas de violaxantina se transforman en moléculas de zeaxantina, favoreciendo la disipación térmica de la energía absorbida.

Además, las plantas disponen de una maquinaria de reparación molecular, que continuamente remedia el daño acaecido y mantiene el fotosistema II en condiciones óptimas de actividad. La reparación del fotosistema II se realiza mediante la rápida sustitución de la proteína D1 inactiva. Cuando falla algún mecanismo desacoplante o de reparación, sufre la planta un proceso de fotoinhibición irreversible, que repercute en la eficiencia fotosintética y en la capacidad asimiladora. El estrés, sea éste nutricional, hídrico, salino o de otro tipo, desencadena a menudo esta fotoinhibición, que reduce de forma drástica la producción vegetal.

Coordinación metabólica

Las dos fases de la fotosíntesis no corresponden a procesos separados o independientes, sino que la transducción fotoelectroquímica y la asimilación de nutrientes están coordinadas y constituyen dos partes de un proceso bioquímico. El estudio de la actividad molecular de la rubisco y del fotosistema II, así como de su interacción específica con CO_2 y O_2, ha permitido desentrañar la relación existente entre la absorción de luz y la fijación de carbono en organismos fotosintéticos.

Pese a su mayor afinidad por el CO_2, la rubisco puede usar O_2 como sustrato alternativo. El fotosistema II puede sustituir su sustrato primario, el agua (donadora de electrones y protones en el centro de manganeso), por bicarbonato (HCO_3^-, equivalente a CO_2 disuelto en agua). Este proceso alternativo basado en bicarbonato, de eficacia muy limitada, habría sucedido en el período Arqueo, como un paso en la evolución de fotosíntesis anoxigénica a oxigénica.

Por tanto, el fotosistema II es capaz de “leer” o “sentir” directamente los niveles de CO_2 y, de forma recíproca, la rubisco los niveles de O_2. El descubrimiento de estas conexiones biomoleculares arroja nueva luz sobre el control y la corregulación entre las dos fases de la fotosíntesis. Además, establece una relación directa entre el balance atmosférico CO_2/O_2 y el equilibrio biomolecular CO_2/O_2, ambos esenciales para la biosfera.

La concentración atmosférica de O_2 y CO_2 ha sufrido notables cambios en el transcurso de la evolución del planeta. La emisión desmedida de CO_2 a la atmósfera, resultante de la acción del hombre, está alterando ese equilibrio. Y afecta a las poblaciones vegetales de la superficie terrestre y marina.

Rotura del equilibrio fotosintético

Según se ha observado, las plantas que crecen en ambientes con una concentración de CO_2 de 350 ppm y una concentración de O_2 sólo del

2 por ciento (en volumen) muestran una mayor tasa de fijación de CO_2 que las que medran en entornos naturales, con una concentración de CO_2 de 350 ppm y un 21 por ciento de O_2. Estos resultados sugieren que el aumento de la concentración de CO_2 se traduce en un incremento de la tasa fotosintética.

Sabemos que se requiere una alta concentración de rubisco en hojas de plantas para obtener una óptima tasa fotosintética. Por lo que se conoce de diversos modelos sobre tendencias, la concentración de la rubisco en los tejidos verdes de plantas podría disminuir un 40 por ciento a 25 ºC si la concentración atmosférica de CO_2 se doblara, o incluso disminuir un 60 por ciento si, junto con este aumento de la concentración de CO_2, se produjera un incremento de la temperatura de 10 ºC.

Un aumento del CO_2 atmosférico produce un aumento de la tasa fotosintética y de la biomasa sólo durante los primeros días de exposición. Después, la tasa fotosintética disminuye hasta alcanzar valores inferiores a los observados en los sistemas control. En ese fenómeno de aclimatación fotosintética, la cantidad de rubisco y la actividad carboxilasa disminuyen pese a mantenerse una concentración elevada de CO_2, mientras que la actividad oxigenasa aumenta cuando se produce, además, un incremento de la temperatura. Tal incremento de la actividad oxigenasa se debe a que la solubilidad de CO_2 en agua disminuye con mayor rapidez que la de O_2.

El aumento de CO_2 atmosférico, del vapor de agua y de la temperatura, con las demás alteraciones climáticas, reflejan las condiciones de un invernadero artificial, donde el crecimiento de las plantas y la producción de biomasa superan los valores normales. Sin embargo, para que esto ocurriera en un ambiente natural, sería necesario proporcionar a las plantas otros nutrientes esenciales: N, P y K. Otra dificultad provendría de la escasez de agua, pues limitaría la apertura estomática y la fijación de carbono, pese a disponer de una concentración de CO_2 atmosférico elevada.

Además, el aumento previsto de la función fotosintética con el aumento de la temperatura incrementaría la producción de oxígeno y, con ello, la probabilidad de formación de especies activas de oxígeno. ¿Podrían en tales circunstancias los sistemas moleculares de fotoprotección amortiguar los efectos inhibitorios de estas especies sobre el aparato fotosintético? ¿Se produciría una

ESTRUCTURA MOLECULAR DEL FOTOSISTEMA II

VISTA FRONTAL — *VISTA SUPERIOR*

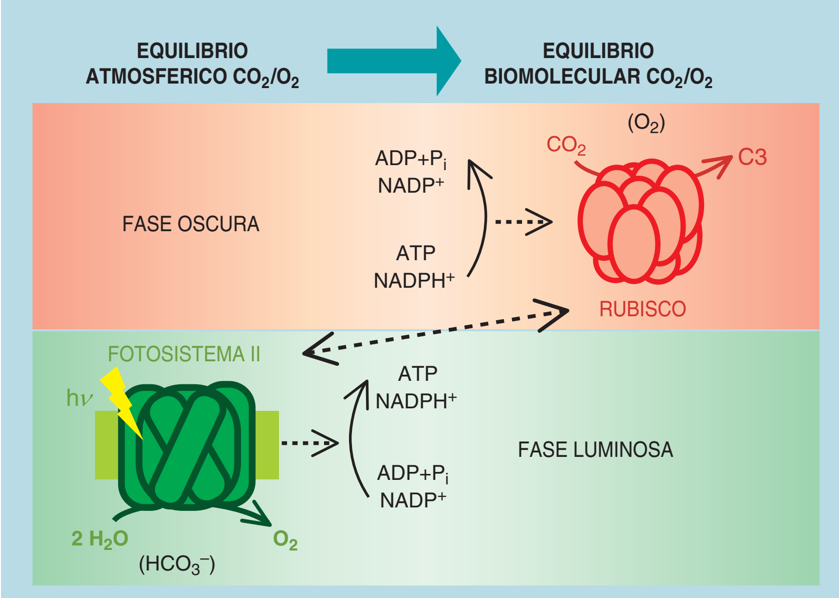
Este esquema muestra los componentes del fotosistema II de la cianobacteria *Synechococcus elongatus*: antenas internas CP47 y CP43, citocromo b_{559}, proteína extrínseca estabilizadora del complejo de iones de Mn (PsbO) y proteínas centrales D1 y D2. (Las coordenadas atómicas se han obtenido del fichero 1FE1 de la base de datos del *Protein Data Bank* depositadas por Zouni *et al.* en 2001.)

TRANSPORTE DE ELECTRONES

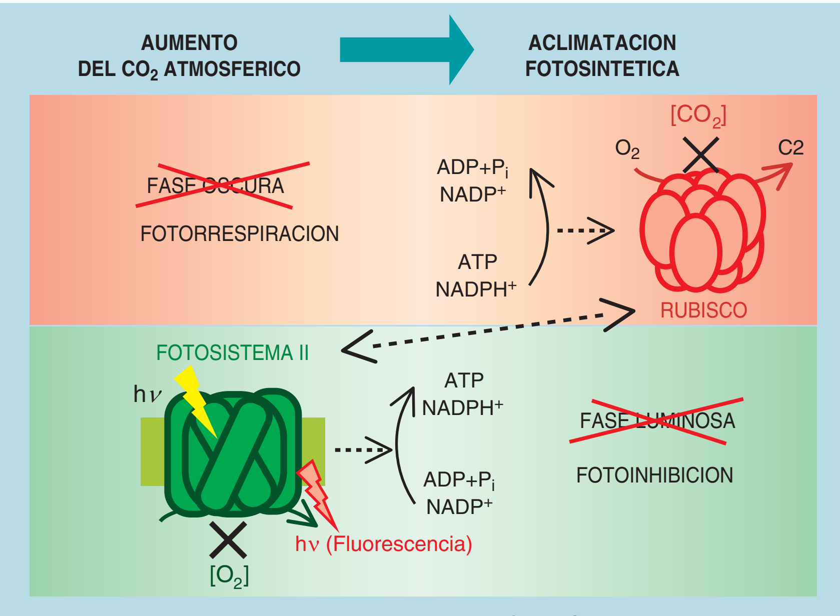
Así se organizan los cofactores de la cadena de transporte electrónico en el centro de reacción D1-D2 del fotosistema II. Las flechas indican el proceso asimétrico que transcurre por la rama P_{680} (D1-D2), feofitina (D1), plastoquinona QA (D2) y plastoquinona QB (D1). Otros agentes reductores como citocromo b_{559}, clorofila$_Z$, tirosina$_D$ y carotenoides (no localizados en la estructura cristalográfica 1FE1) pueden operar como donadores electrónicos alternativos a P_{680} cuando el transporte electrónico desde el complejo de Mn está inhibido.

JUAN B. ARELLANO Y JAVIER DE LAS RIVAS

REGULACION DE LA FOTOSINTESIS



En condiciones de equilibrio atmosférico CO_2/O_2 existe también un equilibrio biomolecular CO_2/O_2: el fotosistema II se ocupa de la primera etapa de la fotosíntesis (desprende O_2) y la rubisco de la segunda etapa (fija CO_2). Cada una de estas enzimas cuenta con un cofactor o sustrato alternativo: bicarbonato (HCO_3^-) para el fotosistema II y oxígeno (O_2) para la rubisco.



Pero el efecto sumidero de las plantas tiene un límite. Si se altera el anterior equilibrio debido a un aumento del CO_2 atmosférico, la fotosíntesis se frena y el sistema de enzimas responde con una aclimatación fotosintética: el fotosistema II activa la fotoinhibición reversible y la rubisco la fotorrespiración (proceso que consume O_2 y libera CO_2).

JUAN B. ARELLANO Y JAVIER DE LAS RIVAS

fotoinhibición irreversible? Lo ignoramos.

Perspectivas y conclusiones

Parece inevitable en el horizonte de este siglo un cambio climático derivado de los factores antropogénicos. El aumento de la concentración del CO_2 atmosférico y de la temperatura, además de las variaciones en los perfiles de precipitaciones atmosféricas, afectarán al desarrollo y a la distribución territorial de numerosas especies vegetales.

Las plantas responderán a estas situaciones de estrés mediante los mecanismos de fotoprotección fisiológicos y moleculares, capaces de "leer" los niveles de CO_2 y O_2 ambientales. La eficiencia de la respuesta fotoprotectora dependerá del alcance de los factores de estrés. En cualquier caso, el mundo vegetal cuenta con una notable capacidad compensatoria y reequilibrante sobre la atmósfera.

El cambio climático que se viene observando en los últimos decenios puede alterar drásticamente las condiciones de habitabilidad de nuestro planeta. Por ello, resulta esencial mantener y desarrollar zonas verdes y recursos naturales con capacidad fotosintética; sin éstos, la acción antropogénica sobre el cambio climático y sobre la vida misma resultará, sin duda, todavía más dañina.

Los autores

Juan B. Arellano y **Javier De Las Rivas** son científicos titulares del CSIC. Doctor en ciencias químicas por la Universidad de Granada, Arellano centra su trabajo en la fotosíntesis, en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca. De Las Rivas ha trabajado como investigador en el Imperial College de la Universidad de Londres y en la facultad de medicina del Mount Sinai en Nueva York; ha sido profesor de bioquímica en la Universidad del País Vasco en Bilbao. Actualmente trabaja en el Centro de Investigación del Cáncer de Salamanca (CIC) y se dedica al estudio estructural y funcional de proteínas y a la genómica funcional.

Bibliografía complementaria

THE ORIGIN OF ATMOSPHERIC OXYGEN ON EARTH: THE INNOVATION OF OXYGENIC PHOTOSYNTHESIS. G. C. Dismukes, V. V. Klimov, S. V. Baranov, Y. N. Kozlov, J. Dasgupta y A. Tyryshkin, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. págs. 2170-2175; 2001.

RISING GLOBAL TEMPERATURE, RISING UNCERTAINTY. R. A. Kerr, en *Science*, vol. 292, págs. 192-194; 2001.

CRYSTAL STRUCTURE OF PHOTOSYSTEM II FROM *SYNECHOCOCCUS ELONGATUS* AT 3.8 Å RESOLUTION. A. Zouni, H. T. Witt, J. Kern, P. Fromme, N. Krauss, W. Saenger y P. Orth en *Nature*, vol. 409, págs. 739-743; 2001.

El cerebro maternal

El embarazo y la maternidad cambian la estructura del cerebro de las hembras de mamífero. En virtud de esa transformación, las madres se muestran diligentes con sus pequeños y les prestan los cuidados oportunos

Craig Howard Kinsley y Kelly G. Lambert

Las madres no nacen, se hacen. En los mamíferos, desde las ratas hasta los monos y los humanos, las hembras experimentan cambios de comportamiento durante el embarazo y la maternidad. La experiencia transforma organismos autónomos, dedicados a sus necesidades y supervivencia, en individuos centrados en el cuidado y bienestar de su prole. Aunque esta transición viene estudiándose desde hace tiempo, es ahora cuando se empieza a comprender sus causas. De acuerdo con la investigación reciente, las drásticas fluctuaciones hormonales operadas durante el embarazo, el parto y la lactancia pueden remodelar el cerebro de la hembra mediante el aumento del tamaño de las neuronas en algunas regiones y la producción de cambios estructurales en otras.

De esas regiones, unas se hallan implicadas en los procesos mentales que rigen la construcción del nido, la higiene de los pequeños o la protección frente a depredadores. Otras, en cambio, controlan la memoria, el aprendizaje y las respuestas ante el miedo y el estrés. Se ha demostrado que las ratas madre superan a las no preñadas en el desplazamiento por laberintos y en la captura de presas. Amén de motivar a las hembras para el cuidado de su prole, los cambios inducidos en el cerebro por las hormonas pueden intensificar la habilidad para conseguir comida, lo que aumenta las posibilidades de supervivencia de la progenie. Es más, estas ventajas cognitivas parecen ser de larga duración, pues persisten hasta que las ratas madre llegan a la vejez.

Aunque los estudios sobre este fenómeno se han centrado siempre en roedores, la maternidad podría conferir ventajas mentales de larga duración también a las mujeres. La mayoría de los mamíferos comparten comportamientos maternales, que deben estar controlados por las mismas regiones cerebrales en ratas y en humanos. De hecho, se ha sugerido que el desarrollo de la conducta materna constituyó uno de los principales motores de la evolución del cerebro de los mamíferos.

En el curso de su evolución a partir de los reptiles, los mamíferos remplazaron la estrategia reproductora de "pon los huevos y corre" por "defiende el nido"; las ventajas, desde el punto de vista de la selección, que ello comportaba privilegiaría la aparición de cambios hormonales en el cerebro con las mejoras cognitivas consiguientes.

Hormonas maternales

Hace medio siglo se descubrió que las hormonas del embarazo avivaban la tendencia protectora de la hembra hacia su prole, en los mamíferos. A principios de los años cuarenta del siglo pasado, Frank A. Beach, de la Universidad de Yale, demostró que el estrógeno y la progesterona, las hormonas de la reproducción femeninas, regulaban la agresividad, la sexualidad y otras respuestas en ratas, hámsteres, gatos y perros. En otro trabajo pionero, Daniel S. Lehrman y Jay S.

1. LOS CAMBIOS DE COMPORTAMIENTO acompañan a la maternidad en casi todos los mamíferos. Nuevos estudios sugieren que las alteraciones que las hormonas inducen en el cerebro femenino provocan que las madres estén más alerta, más entregadas y más sintonizadas con las necesidades de su prole, a la vez que mejoran su memoria espacial y aprendizaje.

JUSTINE COOPER



Rosenblatt, de la Universidad Rutgers, declaraban que, en ratas, la manifestación del comportamiento maternal requería las mismas hormonas. En 1948, Robert S. Bridges observó que la producción de estrógeno y progesterona aumentaba en determinados momentos del embarazo y que la aparición del comportamiento maternal dependía de la interacción entre las hormonas y de la eventual disminución de su concentración. Más tarde, el grupo de Bridges demostró que la prolactina, la hormona que induce la producción de leche, estimulaba el comportamiento maternal en hembras de rata a las que previamente se les había suministrado progesterona y estrógeno.

Además de hormonas, intervienen en la estimulación de los impulsos maternales otras moléculas que afectan al sistema nervioso. En 1980, Alan R. Gintzler, de la Universidad estatal de Nueva York, describió incrementos en la concentración de endorfinas en el transcurso de la preñez de una rata, sobre todo justo antes del parto. Las endorfinas son proteínas analgésicas que se producen en la hipófisis y el hipotálamo. Amén de preparar a la madre para los dolores del parto, las endorfinas podrían activar el comportamiento maternal. En conjunto, los datos demuestran que la regulación de este comportamiento requiere la coordinación de varios sistemas hormonales y neuroquímicos; se corrobora también que el cerebro femenino es extremadamente sensible a las transformaciones operadas durante la preñez.

Se han identificado también las regiones cerebrales que gobiernan la conducta maternal. Michael Numan y Marilyn Numan, de la Universidad de Boston, han demostrado en ratas que, en el cerebro femenino, la responsabilidad de esa actividad compete al área preóptica medial (APOm): la lesión de esa zona del hipotálamo o la inyección de morfina en la misma interrumpen el comportamiento característico de la madre.

Intervienen también otras zonas. En ellas abundan receptores de hormonas, así como sustancias que afectan al sistema nervioso. Paul MacLean, del estadounidense Instituto Nacional de Salud Mental, ha propuesto que las vías nerviosas que cursan del tálamo, o estación de relé, a la corteza cingulada, reguladora de las emociones, constituyen una parte importante de este sistema. En ratas, la lesión de la corteza cingulada de la progenitora desactiva el comportamiento maternal. En 1990, MacLean lanzó la hipótesis de que el desarrollo de estas vías contribuyó en la modelización del cerebro de los mamíferos en su evolución desde el cerebro de reptil.

Resumen/Ingenio materno

- Estudios con múridos han demostrado que las hormonas del embarazo provocan cambios no sólo en las regiones del cerebro que gobiernan el comportamiento materno, sino también en las que regulan la memoria y el aprendizaje.
- Estos cambios cerebrales pueden explicar por qué, en las ratas, las madres superan a las no preñadas en el desplazamiento por laberintos y la depredación.
- Se está investigando si la maternidad confiere ventajas cognitivas también a las mujeres.

Una vez que las hormonas reproductoras inician la respuesta materna, la dependencia del cerebro hacia ellas parece disminuir; la prole estimula, desde entonces, el comportamiento maternal. Aunque un mamífero recién nacido requiere mucha atención y resulta poco atractivo (huele mal, está indefenso y duerme de forma intermitente), la inclinación de la madre hacia la cría adquiere la preeminencia entre todas las manifestaciones animales, incluidos el comportamiento sexual y la alimentación. Según Joan I. Morrell, de la Universidad Rutgers, la prole puede ser la recompensa que refuerza el comportamiento maternal. Puestas a elegir entre cocaína y las crías recién nacidas, la madre prefiere sus crías.

Craig Ferris, de la facultad de medicina de la Universidad de Massachusetts, ha estudiado el cerebro de ratas madre lactantes mediante resonancia magnética. Con esta técnica de formación de imágenes no invasiva que registra cambios en la actividad cerebral, descubrió que la actividad en el nucleus accumbens de la madre se intensificaba cuando cuidaba de sus crías. El nucleus accumbens es una región clave para el sistema de motivación y recompensa.

Por su parte, Ronald J. Gandelman, de la Universidad Rutgers, ha demostrado que, cuando a una madre se le ofrecía la oportunidad de hacerse cargo de crías ajenas —el múrido presiona una barra de su jaula para que las crías se deslicen por una rampa—, la madre seguirá accionando la barra hasta que su jaula se llene de criaturas rosadas agitadísimas.

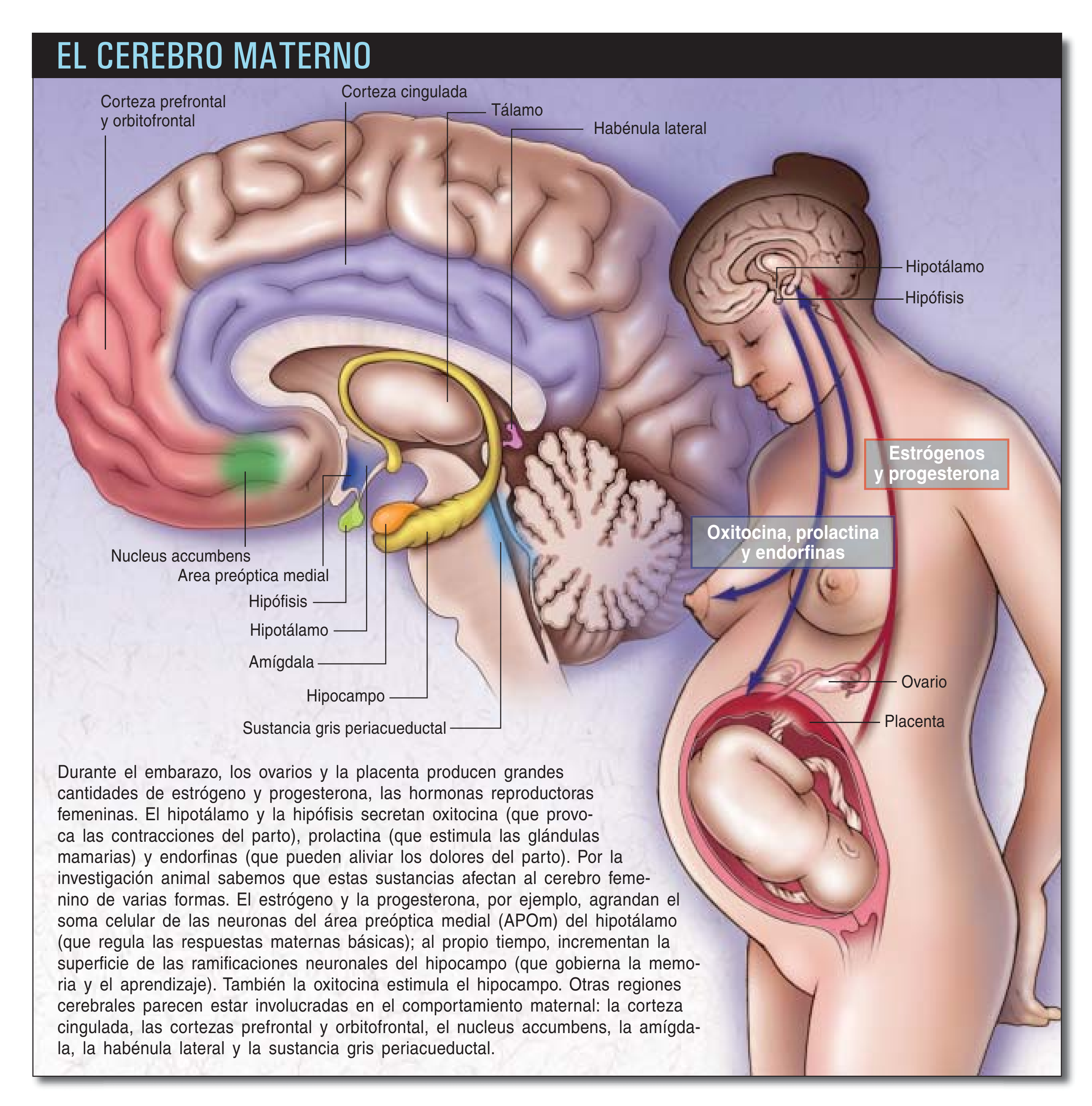
En opinión de varios expertos, cuando las crías lactantes se unen a los pezones de su madre pueden provocar la liberación de minúsculas cantidades de endorfinas en el cuerpo materno. Tales analgésicos naturales pueden actuar de forma parecida a un opiáceo, impulsando a la madre a establecer contacto una y otra vez con sus crías. La acción de amamantar y el contacto con las crías provocan también la liberación de la oxitocina, hormona que puede producir un efecto parecido en la madre.

De lo anterior se desprende que los mamíferos inferiores (ratones y ratas), carentes sin duda de los nobles principios y motivaciones de los humanos, podrían cuidar a sus crías por el placer que les proporciona.

¿Qué decir de los motivos de una madre humana? Jeffrey P. Lorberbaum, de la Universidad de Carolina del Sur, ha recurrido a la técnica de resonancia magnética para examinar el cerebro de la madre mientras oye del llanto de su infante. Los patrones de actividad guardaban semejanza con los de las ratas: la región del APOm del hipotálamo y las cortezas prefontral y orbitofrontal aparecían iluminadas (activas). Asimismo, Andreas Bartels y Semir Zeki, del Colegio Universitario de Londres, descubrieron que las regiones cerebrales que regulan la recompensa se activaban cuando la mujer se limitaba a contemplar su niño. Las semejanzas entre las respuestas de humanos y roedores sugiere la existencia de un circuito materno común en el cerebro de los mamíferos.

Cambios cerebrales

Para comprender el funcionamiento de este circuito, se han abordado los cambios que experimenta el cerebro



Durante el embarazo, los ovarios y la placenta producen grandes cantidades de estrógeno y progesterona, las hormonas reproductoras femeninas. El hipotálamo y la hipófisis secretan oxitocina (que provoca las contracciones del parto), prolactina (que estimula las glándulas mamarias) y endorfinas (que pueden aliviar los dolores del parto). Por la investigación animal sabemos que estas sustancias afectan al cerebro femenino de varias formas. El estrógeno y la progesterona, por ejemplo, agrandan el soma celular de las neuronas del área preóptica medial (APOm) del hipotálamo (que regula las respuestas maternas básicas); al propio tiempo, incrementan la superficie de las ramificaciones neuronales del hipocampo (que gobierna la memoria y el aprendizaje). También la oxitocina estimula el hipocampo. Otras regiones cerebrales parecen estar involucradas en el comportamiento maternal: la corteza cingulada, las cortezas prefrontal y orbitofrontal, el nucleus accumbens, la amígdala, la habénula lateral y la sustancia gris periacueductal.

TAMI TOLPA

femenino en distintas etapas reproductoras. En los años setenta, Marian C. Diamond, de la Universidad de California en Berkeley, aportó algunos de los primeros datos, obtenidos en el estudio sobre la corteza cerebral de ratas preñadas. La capa más externa del cerebro, la corteza, recibe y procesa la información sensorial; controla también los movimientos voluntarios. Las ratas criadas en ambientes enriquecidos sensorialmente (con ruedas, juguetes y túneles) desarrollan cortezas con plegamientos más intrincados que las ratas mantenidas en jaulas desnudas.

Sin embargo, Diamond descubrió que la corteza de ratas preñadas procedentes de entornos pobres en estímulos sensoriales mostraba una complejidad equiparable a la de las ratas procedentes de entornos estimulantes. Y extrajo la conclusión de la necesaria combinación de hormonas y factores fetales en la activación del cerebro de ratas preñadas.

Dos decenios más tarde, demostrada la importancia del APOm en el comportamiento materno, se inició el estudio de los cambios experimentados por esa región cerebral. A mediados de los noventa, Lori Keyser, de la Universidad de Richmond, mostró que el volumen del cuerpo celular de las neuronas del APOm de ratas preñadas aumentaba. Y no sólo eso, la longitud y el número de dendritas de las neuronas del APOm aumentaban a medida que progresaba la preñez. Observó los mismos cambios en hembras sometidas a un tratamiento que imitaba la preñez, basado en la administración de progesterona y estradiol, el estrógeno natural de mayor potencia. Estas alteraciones neuronales suelen ir acompañadas de un aumento de la síntesis y actividad proteicas. En esencia,

las hormonas del embarazo “suben de revoluciones” a las neuronas del APOm, anticipándose al parto y a los requerimientos de la maternidad. Tras el parto, las neuronas del APOm dirigen la atención y la motivación de la madre hacia su camada; ello la capacita para el cuidado, protección y alimentación de las crías mediante toda la gama de comportamientos maternales.

Pero la conducta maternal de las ratas comprende múltiples tareas que trascienden los cuidados de la prole. Cabía, pues, suponer que otras regiones cerebrales podrían también sufrir cambios, relacionados con los riesgos que entraña el cuidado del nido y las crías. Con frecuencia la madre debe abandonar el nido para buscar comida; si permaneciera allí, ella y su camada morirían de hambre. Con ello, sin embargo, aumenta su propia vulnerabilidad y la de su prole ante los depredadores.

En nuestra opinión, dos cambios cognitivos mejorarían la eficacia de la rata en la ejecución de esta arriesgada tarea. En primer lugar, un aumento de la destreza para conseguir alimento; por ejemplo, una mayor capacidad espacial para desplazarse por el entorno reduciría el período de tiempo que pasa alejada del nido. En segundo lugar, una disminución del miedo y la ansiedad le ayudaría a tomar la decisión de abandonar el nido, le permitiría encontrar comida con mayor prontitud y le armaría de valor para enfrentarse a un entorno hostil.

En 1999 encontramos respaldo para la primera hipótesis: demostramos que, en ratas, la maternidad incrementaba el aprendizaje y la memoria espaciales. Las hembras jóvenes que habían experimentado uno o dos embarazos se las ingeniaban mucho mejor que las no preñadas de la misma edad a la hora de recordar la ubicación de una recompensa alimenticia en dos tipos de laberintos: uno radial de ocho brazos y una versión en tierra firme del laberinto acuático de Morris, un recinto circular con nueve pocillos con comida provistos de cebo. Se observó una mejora en la habilidad para conseguir comida en hembras lactantes así como en madres que llevaban al menos dos semanas sin amamantar a sus crías. Además, las hembras sin preñar al cuidado de crías ajenas se comportaron de forma similar a las lactantes. Este resultado sugiere que la mera presencia de la prole potencia la memoria espacial, bien mediante la estimulación de actividades cerebrales que alteran estructuras neuronales o bien provocando la secreción de oxitocina.

¿Se estimula en las madres alguna otra habilidad relacionada con la obtención de comida? En un trabajo reciente sobre ratas, Naomi Hester, Natalie Karp y Angela Orthmeyer, del laboratorio de uno de los autores (Kinsley), han demostrado que las madres son más rápidas que las no preñadas en la depredación. Progenitoras y no preñadas, ambas privadas de alimento, se colocaron en un recinto cuadrado de 1,5 metros de lado tapizado de virutas de madera, entre las que se escondía un grillo. Las ratas sin preñar tardaron por término medio unos 270 segundos en descubrir la presa; las lactantes, en cambio, apenas si tardaron algo más de 50 segundos. Incluso cuando la prueba se realizó con ratas no preñadas más hambrientas o cuando se enmascaró el ruido del grillo, las progenitoras hallaron mucho antes la pieza.

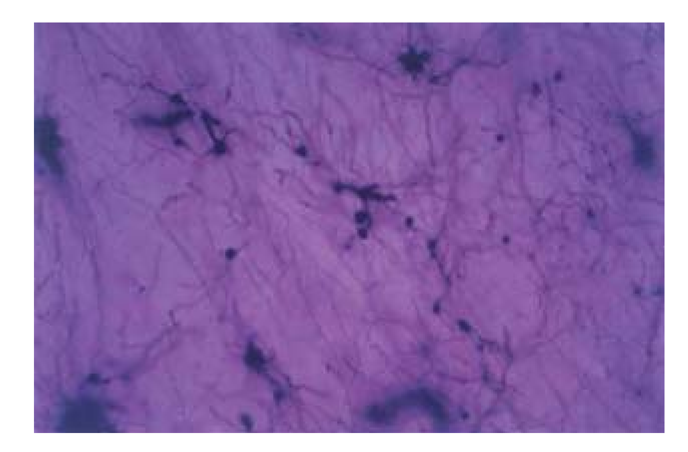
En relación con la segunda hipótesis, Inga Neumann, de la Universidad de Regensburg, ha demostrado que las ratas preñadas y lactantes padecen menos miedo y ansiedad que las ratas no preñadas al enfrentarse a desafíos como la natación forzada. (Esos parámetros se estiman a partir de la concentración sanguínea de hormonas de estrés.) Jennifer Wartella confirmó estos resultados. Para ahondar en ellos, examinó el comportamiento de las ratas en el recinto cuadrado de 1,5 metros de lado; descubrió que las progenitoras eran más propensas a investigar el territorio y menos propensas a permanecer quietas, dos rasgos indicativos de audacia. Además, se detectó una disminución de la actividad neuronal en la región CA3 del hipocampo y la amígdala basolateral, dos zonas del cerebro que regulan el estrés y las emociones. La resultante mitigación del miedo y del estrés, junto con la intensificación de las habilidades espaciales aseguran que la progenitora se decida a abandonar el nido para conseguir comida y regresar lo antes posible al hogar para cuidar de su vulnerable camada.

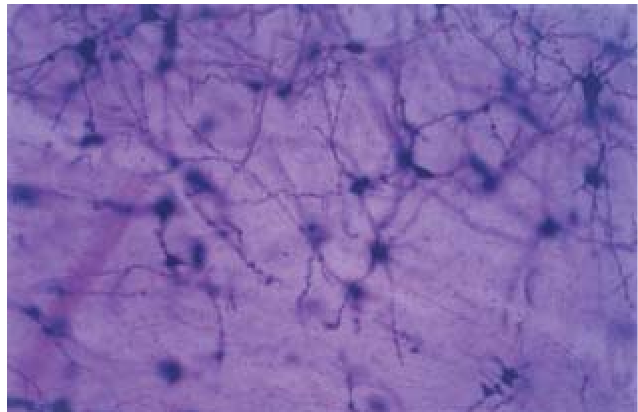
Las alteraciones del hipocampo, que regula el aprendizaje, la memoria y las emociones, parecen desempeñar un papel fundamental en estos cambios de comportamiento. Catherine Woolley y Bruce McEwen, de la Universidad Rockefeller, demostraron que durante el ciclo estral de la rata hembra (el equivalente al ciclo menstrual humano) se producen oscilaciones en la región CA1 del hipocampo. En esta zona, la densidad de las espinas dendríticas aumentó conforme crecía la concentración de estrógeno de la hembra. (Las espinas son unas diminutas prolongaciones acuiformes que aportan una mayor superficie para la recepción de señales nerviosas.) Si las leves fluctuaciones hormonales que tienen lugar durante el ciclo estral provocaban cambios estructurales de tanta importancia, ¿qué le ocurriría al hipocampo durante la preñez, cuando las concentraciones de estrógeno y progesterona se mantienen elevadas durante un período prolongado?

Graciela Stafisso-Sandoz, Regina Trainer y Princy Quadros, del grupo de Kinsley, examinaron el cerebro de ratas durante las etapas finales de la preñez y el de otras hembras tratadas con hormonas del embarazo. Hallaron una concentración de espinas en la región CA1 superior a la normal. Dado que éstas envían información a sus correspondientes neuronas, el aumento de su densidad durante la preñez podría contribuir al reforzamiento de la capacidad de las progenitoras para desenvolverse por el laberinto y depredar.

La oxitocina, la hormona que provoca las contracciones del parto y la producción de leche, parece producir efectos también sobre el hipocampo, que mejoran la memoria y el aprendizaje. Según los resultados de Kazuhito Tomizawa, de la Universidad de Okayama, la oxitocina promueve el establecimiento de conexiones de larga duración entre las neuronas del hipocampo. Inyecciones de oxitocina en el cerebro de ratas no preñadas mejoraron su memoria a largo plazo, probablemente mediante el incremento de la actividad enzimática que refuerza las conexiones neuronales. En cambio, la inyección de inhibidores de la oxitocina en el cerebro de progenitoras perjudicaba su rendimiento en actividades relacionadas con la memoria.

Otros investigadores se han centrado en los efectos de la maternidad sobre las células de la glía, el tejido conjuntivo del sistema nervioso central. Gordon W. Gif-





2. EL SOMA CELULAR de las neuronas del APOm de una rata no preñada (*izquierda*) es mucho menor que el de una rata preñada (*derecha*). Las hormonas del embarazo parecen "subir de revoluciones" a las neuronas del APOm, mediante la estimulación de la síntesis y la actividad proteicas, anticipándose a los requerimientos de la maternidad.

ford, del grupo de Kinsley, ha examinado astrocitos, células gliales con forma de estrella que proporcionan nutrientes y soporte estructural a las neuronas. Ha descubierto que los astrocitos del APOm y del hipocampo de ratas hembra, en las etapas finales de la preñez, lactantes o que habían recibido tratamiento hormonal eran más complejos y numerosos que los de las no preñadas. De nuevo, parece que las fluctuaciones hormonales disparan la actividad neuronal durante el embarazo, mediante modificaciones en neuronas y células gliales, de regiones cerebrales críticas, que intensifican el aprendizaje y la memoria espacial.

¿Se mantienen estas ventajas cognitivas más allá del período de lactancia? Jessica D. Gatewood, del equipo de Kinsley, ha observado que las ratas madre de hasta dos años de edad (el equivalente a una mujer de más de 60 años) aprenden a realizar ejercicios espaciales con mayor prontitud que las no preñadas de la misma edad; además, manifiestan pérdidas de memoria menos pronunciadas. En todas las edades ensayadas (6, 12, 18 y 24 meses), las madres obtenían mejores resultados que las no preñadas a la hora de recordar la ubicación de las recompensas alimenticias en los laberintos. Al examinar el cerebro de las progenitoras, terminados los experimentos, se hallaron menos depósitos de proteínas precursoras de amiloides en dos zonas del hipocampo: la región CA1 y el giro dentado. Se trata de proteínas involucradas, así se cree, en la degeneración del sistema nervioso durante el envejecimiento.

A partir de una cepa de ratas distinta y variando las condiciones experimentales, Jennifer Love, Ilan M. McNamara y Melissa Morgan, del grupo de uno de los autores (Lambert), han confirmado que el aprendizaje espacial a largo plazo se intensifica en las progenitoras más viejas. Midieron también su astucia en un laberinto en cruz; con dos brazos abiertos, los roedores tratan de evitarlo, pues los animales se encuentran en él expuestos en alto, sin ningún escondrijo donde cobijarse. En la mayoría de las edades ensayadas (hasta los 22 meses) las madres permanecían más tiempo que las no preñadas en los temidos brazos desprotegidos. El examen del cerebro de las progenitoras reveló un número inferior de células degeneradas en la corteza cingulada así como en las cortezas frontal y parietal, regiones que reciben una considerable cantidad de información sensorial. Estos resultados sugieren que la exposición reiterada del cerebro femenino a las hormonas del embarazo, unido a un entorno sensorialmente rico del nido, pueden mitigar algunos efectos del envejecimiento sobre la cognición.

La conexión humana

¿Adquieren las mujeres alguna ventaja cognitiva similar en razón del embarazo y la maternidad? La investigación revela que el cerebro humano experimenta, a buen seguro, cambios en los sistemas de regulación sensorial análogos a las alteraciones observadas en otros animales. Alison Fleming, de la Universidad de Toronto en Mississauga, ha demostrado que, en los humanos, la madre reconoce olores y sonidos de sus pequeños, probablemente debido a un aumento de sus capacidades sensoriales. Las parturientas que presentaban concentraciones elevadas de la hormona cortisol en sangre muestran mayor atracción y motivación hacia los olores de sus bebés y destreza mayor para reconocer su llanto. Los resultados indican que el cortisol, cuya concentración suele aumentar con el estrés (lo que resulta perjudicial para la salud), puede tener un efecto positivo en las madres primerizas. A través del aumento de los niveles de cortisol, el estrés de la maternidad puede estimular la atención, la vigilancia y la sensibilidad, reforzando los vínculos materno-filiales.

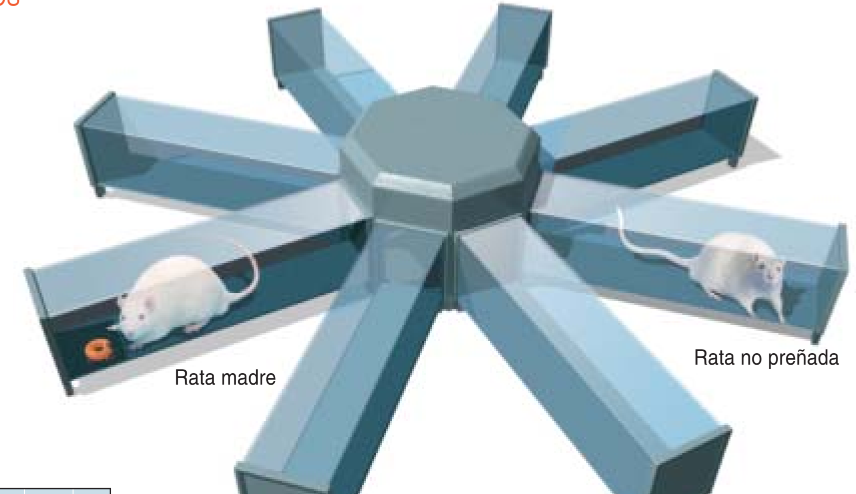
Otros trabajos sugieren un efecto a largo plazo de la maternidad. En un estudio demográfico sobre Nueva Inglaterra, el equipo dirigido por Thomas Perls, de la Universidad de Boston, halló que las mujeres que se habían quedado embarazadas a los 40 años o después tenían cuatro veces más probabilidades de superar los 100 años de edad que las que se habían quedado embarazadas en una etapa más temprana de su vida. Según Perls, las mujeres que se habían quedado embarazadas de forma natural a partir de los 40 años envejecían a un ritmo inferior. Nosotros añadiríamos que el embarazo y la posterior experiencia maternal podrían haber potenciado el cerebro de las mujeres durante un período crucial, justo cuando la disminución de las hormonas reproductoras inducida por la menopausia daba comienzo. Los beneficios cognitivos de la maternidad

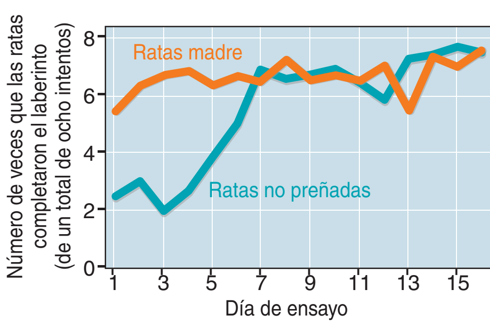
DESTREZAS MATERNALES

En los experimentos se ha comprobado que la maternidad potencia el aprendizaje y la memoria espaciales, al tiempo que mitiga el miedo y el estrés. Estos cambios de comportamiento mejoran la capacidad de la madre para conseguir alimento, lo que aumenta las posibilidades de supervivencia de la prole.

LABERINTO RADIAL DE OCHO BRAZOS

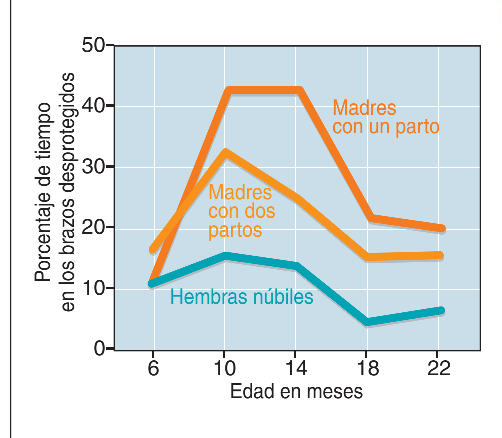
Se empezó por familiarizar a las ratas con un laberinto radial; en un principio, se colocaron cebos con comida en los ocho brazos, después en cuatro, luego en dos y, por fin, sólo en uno. A continuación, se midió la destreza de las ratas para recordar qué brazo seguía conteniendo comida. Las progenitoras con dos partos o casi culminaban siempre el laberinto con éxito desde el primer día de experimentación; es decir, encontraban el cebo en menos de tres minutos. En cambio, las ratas sin preñar no lo lograban hasta el séptimo día.

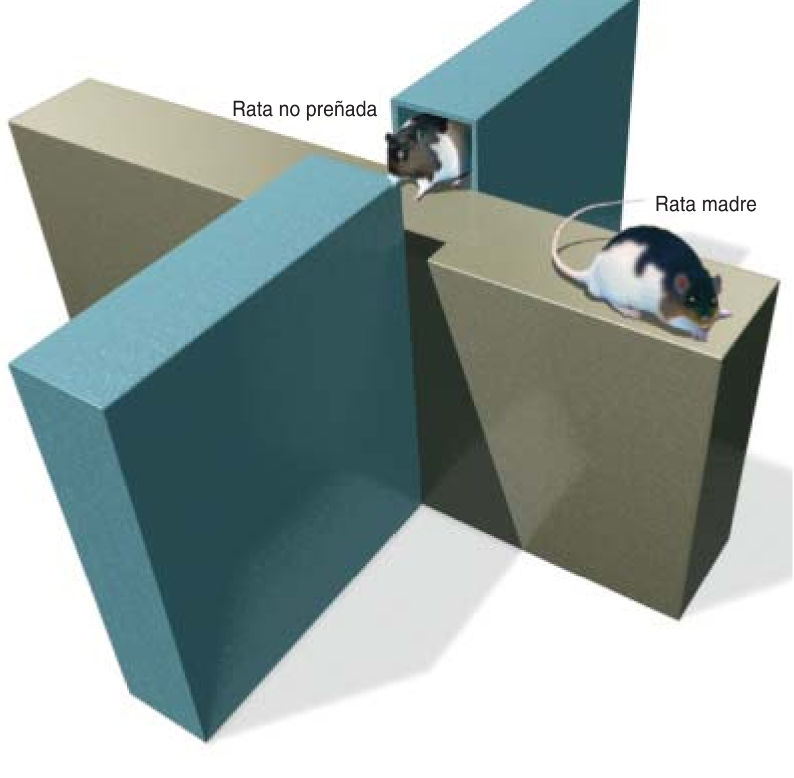




LABERINTO ELEVADO CRUCIFORME

En este laberinto en cruz, elevado a 1,2 metros del suelo, se midió cuánto tiempo pasaban las ratas en los dos brazos abiertos, que los múridos tienden a evitar dado que, a diferencia de los brazos cubiertos, no ofrecen cobijo. A cualquier edad, la madre evidenciaba mayor audacia que la no preñada: pasaba más tiempo en los temidos brazos desprotegidos.





SLIM FILMS

pueden haber contribuido a contrarrestar la pérdida de las hormonas que ayudan a conservar la memoria, lo que se traduce en una mejor salud neuronal y una mayor longevidad.

¿Confiere la maternidad ventajas para competir con otras mujeres? Por desgracia, escasean en humanos los estudios comparados que cotejan la capacidad de aprendizaje y memorística espacial de las madres y de las que no han procreado. En 1999, J. Galen Buckwalter, de la Universidad del Sur de California, demostró que las embarazadas obtenían resultados inferiores a la media en varias pruebas de memoria verbal, si bien, poco después del parto, sus puntuaciones remontaban. El estudio, basado en una muestra estadística de sólo 19 individuos, no encontró cambios en la inteligencia general. En *The Mommy Brain*, Katherine Ellison aporta numerosos ejemplos que sugieren que las destrezas adquiridas a través de la maternidad podrían ayudar a las mujeres también en su puesto de trabajo, pues la capacidad de liderazgo requiere sensibilidad hacia las necesidades de los empleados y un estado de alerta permanente ante desafíos y amenazas inminentes. ¿Se transfieren tales habilidades de la cuna a la sala de reuniones?

Las investigaciones han empezado a centrarse en una habilidad que tradicionalmente se asocia a la maternidad: la capacidad para hacer varias cosas a la vez. ¿Son los cambios en el cerebro materno responsables de que las madres sopesen las exigencias simultáneas —cuidado de los niños, trabajo, obligaciones sociales, etcétera— mejor que las que no son madres? Ignoramos la respuesta. Sí sabemos que el cerebro humano posee una elasticidad notable: su estructura y actividad cambian cuando una persona se enfrenta a un desafío.

Arne May y su grupo, de la Universidad de Regensburg, han detectado cambios estructurales en el cerebro de hombres y mujeres jóvenes que habían aprendido a hacer malabarismos con tres pelotas en el aire: las regiones dedicadas a la percepción y a la predicción del movimiento se expandieron después de que aprendieran los malabarismos; luego, cuando dejaron de practicar, se contrajeron. Asimismo, es posible que las alteraciones que tienen lugar en el cerebro materno capaciten a la madre para realizar con destreza los "malabarismos" que exige la maternidad.

La investigación animal revela que las ratas parturientas son particularmente buenas en la realización simultánea de varias tareas (capacidad multitarea). Los experimentos realizados en el laboratorio de Lambert han demostrado que las madres casi siempre superan a las no preñadas en las pruebas que incluyen el seguimiento simultáneo de imágenes, sonidos, olores y otros animales. En una carrera por descubrir uno de sus alimentos preferidos (aritos de cereales con sabor a frutas), las ratas que habían experimentado dos o más embarazos eran las primeras en conseguir el manjar el 60 por ciento de las veces. Las ratas que habían parido en sólo una ocasión consiguieron el premio el 33 por ciento de las veces; las no preñadas sólo el 7 por ciento.

¿Qué decir del cerebro paterno? ¿Adquieren alguna ventaja mental los padres que cuidan de su prole? Los estudios realizados con el tití común, un pequeño mono de Brasil, aportan algunas pistas. Los titís son monógamos; ambos progenitores participan en el cuidado de la prole. En colaboración con Sian Evans y V. Jessica Capri, de la Jungla de los Monos en Miami, Anne Garrett, del laboratorio de Lambert, estudió ambos progenitores en un "árbol comedero" en el que los monos debían descubrir qué contenedores escondían la mayor parte de la comida. Los progenitores (madres y padres) superaron a los que no habían tenido descendencia.

La investigación confirmó otros estudios anteriores realizados sobre ratones de la especie *Peromyscus californicus*. Aquí el macho contribuye de forma notable al cuidado de las crías. Erica Glasper y otros alumnos del laboratorio de Lambert descubrieron que los ratones progenitores de ambos sexos sacaban mejores puntuaciones que sus homólogos "solteros" en el laberinto de tierra firme. Ashley Everette y Kelly Tu demostraron que los padres eran más rápidos también a la hora de examinar piezas de Lego y otros estímulos nuevos.

En resumen, la experiencia reproductora promueve cambios en el cerebro de los mamíferos que alteran el comportamiento y la destreza, sobre todo en las hembras. Para éstas, el mayor desafío consiste, desde un punto de vista evolutivo, en asegurar la prosperidad de su inversión genética. La conducta maternal ha evolucionado para incrementar las posibilidades de éxito de la hembra. Ello no significa que las madres sean mejores que sus homólogas sin preñar en la realización de cualquier tarea; lo más probable es que se potencien sólo los comportamientos que afectan a la supervivencia de la camada. Con todo, son muchos los beneficios cognitivos que la maternidad aporta a medida que el cerebro materno va superando el desafío reproductor. En otras palabras, la necesidad aguza el ingenio.

Los autores

Craig Howard Kinsley y **Kelly G. Lambert** vienen investigando, desde hace más de un decenio, los efectos del embarazo y la maternidad sobre el cerebro femenino. Kinsley ocupa la cátedra MacEldin Trawick de Neurociencias en el departamento de psicología y en el Centro de Neurociencias de la Universidad de Richmond. Lambert enseña neurociencias del comportamiento y psicología en la Universidad Randolph-Macon, donde dirige el departamento de psicología.

Bibliografía complementaria

MOTHER NATURE: MATERNAL INSTINCTS AND HOW THEY SHAPE THE HUMAN SPECIES. Sarah B. Hrdy. Ballantine Books, 2000.

THE MATERNAL BRAIN: NEUROBIOLOGICAL AND NEUROENDOCRINE ADAPTATION AND DISORDERS IN PREGNANCY AND POST PARTUM. Dirigido por J. A. Russell, A. J. Douglas, R. J. Windle y C. D. Ingram. Elsevier, 2001.

A TRIBUTE TO PAUL MACLEAN: THE NEUROBIOLOGICAL RELEVANCE OF SOCIAL BEHAVIOR. Dirigido por K. G. Lambert y R. T. Gerlai. Número especial de *Physiology and Behavior*, vol. 79, n.º 3; agosto 2003.

THE NEUROBIOLOGY OF PARENTAL BEHAVIOR. Michael Numan y Thomas R. Insel. Springer Verlag, 2003.

El globo cometario de Vincenzo Coronelli

En el globo celeste de Tréveris construido por Vincenzo Coronelli figura el cometa de 1661 descrito por Johannes Hevelius. Pudo tratarse del mismo cometa Ikeya-Zhang que retornó en 2002

Wilhelm Seggewiss

La ciudad alemana de Tréveris (*Trier*, en el estado de Renania-Palatinado) posee una magnífica pareja de globos, uno terrestre y el otro celeste, expuestos en una sala de su Biblioteca Municipal. El diámetro de ambos globos es de 108 cm; la altura total, con sus pedestales, monturas y anillos con las escalas, llega casi a los dos metros (*véase la figura 1*). El creador de estos globos fue un franciscano de Venecia, Vincenzo Coronelli.

La agitada vida de su constructor

De orígenes modestos, Vincenzo Coronelli (1650-1718) ingresó a los quince años en la Orden de los Hermanos Menores en Venecia, su ciudad natal. Con dieciséis publicaba su primera obra, el *Calendario perpetuo sacro-profano*. Estudió en Roma y allí obtuvo el grado de doctor en teología. En 1678 se dirigió a Parma, donde construyó para el duque Farnesio una pareja de globos, hoy en día por desgracia desaparecida, también uno terrestre y el otro celeste. El cardenal César d'Estrées, canciller de la corte francesa, quedó tan entusiasmado al verlos, que llamó a Coronelli a Versalles para que construyese allí otros dos para el Rey Sol, Luis XIV. Tres años tardó en crear un par de globos descomunales, de casi 4 m de diámetro. Podía entrarse en su interior, donde cabían hasta 30 personas; en el celeste habrían podido observar el cielo casi como si de un planetario se tratase. Nunca se los expondría en Versalles, sino en otra residencia real, la de Marly. Tras diversos avatares, estuvieron almacenados durante veintitantos años, salvo exposiciones esporádicas, en la Ciudad de la Ciencia de La Villette, en París; ahora se encuentran en la Biblioteca Georges Pompidou, también de París.

Tras este éxito comenzó para Vincenzo Coronelli una incansable vida de geógrafo, astrónomo, editor e ingeniero. Recorrió Europa entera varias veces y se mantuvo en estrecho contacto con los príncipes y los científicos más importantes de su tiempo: Leopoldo I y Carlos VI en Viena, Guillermo III en Londres y el Bey de Túnez, a quien debió de regalar globos y atlantes con el ruego de que liberase a unos esclavos. En 1696, se relacionó con el Príncipe Elector de Tréveris, el obispo Juan Hugo de Orsbeck.

Coronelli fue nombrado cosmógrafo de Venecia, donde desempeñó múltiples cometidos. Allí dio a grabar y publicar un atlas de grandes dimensiones, el *Atlante veneto*, con el material geográfico que había recogido a lo largo de sus viajes. En 1684 fundó la primera sociedad geográfica de alcance internacional, la *Accademia Cosmografica degli Argonauti*. Además, editó una enciclopedia monumental, la *Biblioteca universale sacro-profana*. Sólo vieron la luz siete de los cincuenta volúmenes planeados; bastó para que Coronelli se erigiera en modelo de los enciclopedistas franceses. También construyó máquinas hidráulicas y se especializó en la regulación de cauces fluviales y la construcción de canales. El emperador Carlos VI le llamó a Viena en 1717 en el marco del plan de canalización del Danubio. Sin embargo, Coronelli, que murió en 1718, no pudo llevar a cabo sus proyectos para el territorio danubiano.

Pero, por encima de todo, Vincenzo Coronelli era constructor de globos. Expuso los fundamentos del arte en *Epitome cosmografica o compendiosa introdutione all'astronomia, geografia & idrografia*, obra de unas 500 páginas dedicada al emperador Leopoldo I. Esta combinación grandiosa constituía una introducción a la astronomía y a la geografía, amén de manual de referencia de ambas ciencias y guía para la construcción de globos. Se reeditó varias veces, corregida. Coronelli produjo además cinco series de globos de distintas dimensiones: desde las 2 pulgadas de diámetro (tan sólo 5 cm) a 3 pulgadas y un tercio (8,5 cm), 6 pulgadas (15 cm), 1 pie y medio (48 cm) y 3 pies y medio (aproximadamente 108 cm). Confió la distribución a representantes de

1. VISTA DE CONJUNTO del globo celeste de Vincenzo Coronelli expuesto en la Biblioteca Municipal de Tréveris.



STERNE UND WELTRAUM

distintas partes de Europa. En Alemania su agente fue Matteo Alberti (1646-1737), aristócrata veneciano establecido en Düsseldorf, donde ejercía también como arquitecto de Juan Guillermo, Príncipe Elector del Palatinado y duque de Jülich y Berg (1658-1716).

Los globos de Tréveris

Los globos de Tréveris fueron adquiridos en 1699 por el Príncipe Elector Juan Hugo de Orsbeck. El precio que se pagó a Alberti consta en los libros de cuentas: "*150 pistolas (doblones) de oro más 3 3/4 táleros, que hacen 562 táleros y 27* albusse". Además, Alberti recibió una "cápsula de diamante", así como un retrato del príncipe de notable factura, para añadir al cómputo otros 150 táleros. Los táleros y los *albusse*, o céntimos, del año 1699 difícilmente pueden traducirse a euros, pero vienen a equivaler al sueldo anual de un secretario de ayuntamiento de esa época. Se supone que fue el tercer sucesor de Orsbeck, el Príncipe Elector Juan Jorge de Schönborn, quien entregó la pareja de globos a los jesuitas de Tréveris. El motivo fue la reorganización de la sala de la biblioteca del colegio de la Compañía en 1732. Tras la disolución de esa orden religiosa en 1773, se unificó la biblioteca colegial con la de la universidad y, en medio de las convulsiones de la Revolución Francesa, se trasladaron en 1804 los fondos que aún quedaban en ella a otras bibliotecas municipales. Doscientos veinticinco años después de su instalación en la biblioteca histórica, los globos se expusieron en 1957 en el nuevo edificio de la Biblioteca Municipal. En 1984 fueron magníficamente restaurados. Su estado de conservación aventaja, con mucho, al de otros ejemplares de esas dimensiones.

La estructura de los globos de Tréveris debió de construirse en la sede de Alberti en Düsseldorf. Los globos albergan en su interior un armazón estable de madera, que soporta segmentos de madera curvados donde van clavadas cartulinas. El conjunto se recubre con lienzo untado con una mezcla de creta y de cola de huesos hasta formar una esfera perfecta, de superficie lustrosa. Sobre el globo se pegaron los segmentos de grabado; se los coloreó y se les aplicó un barniz protector. Coronelli encargaba a maestros de París y Venecia los grabados.

Los expertos en la obra de Coronelli distinguen en sus globos celestes, fundamentalmente, tres ediciones de las ilustraciones, grabadas entre los años 1688 y 1700. Sin embargo, dentro de una misma edición las planchas de cobre se reelaboraban una y otra vez. Los globos de Coronelli eran auténticas joyas y, a la vez, piezas eruditas muy codiciadas por las bibliotecas de príncipes, universidades y órdenes religiosas. Aún se conservan una cincuentena aproximada de esas parejas, en su mayor parte completas; alrededor de la mitad se encuentran en Italia. En Alemania hay siete.

Los grandes globos constan de 50 segmentos: doce en cada una de cuatro divisiones que abarcan 40º de declinación (o de latitud geográ-



2. IMAGEN ESTELAR DE LA OSA MAYOR y tarjeta con la dedicatoria en el globo celeste de Coronelli. Rodea a la Osa la constelación del río Jordán, cubierta hoy por las constelaciones de los Perros de caza, León menor y el Lince. Bajo el vientre de la Osa empieza la trayectoria de 1607 del cometa Halley, observada por Kepler y marcada con el símbolo de los cometas en color rojo intenso; de la parte posterior de la Osa sale la trayectoria del cometa de diciembre de 1664. Al sudeste (*abajo a la izquierda*) se ve una parte de la Cabellera de Berenice con el cometa de 1558, observado en Kassel por el landgrave Guillermo IV de Hesse (1532-1592). En el río Jordán (*en el borde de abajo*) empieza la trayectoria del cometa Halley de 1531, observado por Pedro Apiano.

STERNE UND WELTRAUM

fica), más dos segmentos circulares para los casquetes polares. El recubrimiento de estos segmentos bidimensionales podría estirarse al humedecerse con el encolado; así los adaptarían perfectamente a la superficie de la esfera. En total, los globos alcanzan una superficie de 3,66 m^2. Por tanto, Coronelli disponía de mucho espacio en sus globos. Y lo aprovechó para una exhibición de barroco esplendor visual, tal y como hacían otros constructores de globos de su época. Pero Coronelli supo unir a esa magnificencia sus pretensiones científicas de "cosmógrafo".

El cielo en la esfera. Dos redes de coordenadas

Los dos globos de Tréveris (el terrestre y el celeste) se apoyan sobre sendos magníficos pedestales barrocos. La base es un zócalo de madera de seis lados, que descansa a su vez sobre seis pies en forma de garras de león; la adornan estucos dorados con motivos florales. En el globo celeste, cuatro barrotes torsos anulares de hierro forjado soportan el círculo del horizonte, fabricado en madera (en el exterior presenta ocho lados, si bien su interior es circular); lo cruza el círculo meridiano (de latón, con escala de madera). Esta esfera celeste gira solidariamente con el círculo meridiano, al que está unida por los polos norte y sur. Se puede mover el círculo meridiano con respecto al círculo del horizonte para ajustar la altura polar a las latitudes de los lugares donde se instale el instrumento.

El globo celeste está surcado por una fina red de líneas con la graduación ecuatorial (*véanse las figuras 2 y 3*). El ecuador celeste se marca con un círculo, dividido en 360 grados, de trazos negros y blancos alternantes. Cada 30 grados hay círculos así resaltados, perpendiculares al ecuador, al Trópico de Cáncer y a los círculos polares. Entre cada par de estos círculos resaltados se ve una red de líneas finas, de 5 en 5 grados de ascensión recta y de declinación. Pero lo realmente especial de este globo es una segunda red de graduación; se halla en coordenadas eclípticas, con líneas finamente punteadas (tan sólo la eclíptica está señalada con trazos gruesos negros y blancos). Con esas coordenadas ecuatoriales y eclípticas se disponían y descubrían con exactitud los objetos celestes sobre el globo.

Las constelaciones

Los buenos conocedores de este tipo de globos notarán con sorpresa que la Osa Mayor y el Unicornio miran a la derecha y que sus colas apuntan a la izquierda (*véanse las figuras 1 y 2*). El globo de Tréveris representa el cielo con la ascensión recta en disminución hacia la derecha, como en las cartas estelares. Esta representación, llamada "*cóncava*", no es la habitual en los globos celestes. Lo es la especular (o "*convexa*"), que correspondería a la observación de la esfera celeste desde un punto situado fuera de ella; aparecería entonces cóncava, tal y como vemos los globos celestes.

El globo de Tréveris procede de una serie cóncava cuyos segmentos editó Coronelli en Venecia en 1693. A esta circunstancia alude también la leyenda contenida en una cartela puesta delante de la Osa Mayor (*véase la figura 2*), que dedica el globo "*Alla Serenissima Republica, e Serenissimo Prencipe Francesco Morosini, Doge di Venetia*". El globo representa 75 constelaciones mediante figuras: junto a las doce clásicas del zodíaco hay otras 29 en el hemisferio norte y 34 en el sur. Los textos que acompañan a las figuras están escritos en italiano, francés, latín, griego y árabe.

Coronelli recoge las 48 constelaciones que aparecen en el *Almagesto* de Claudio Ptolomeo, además de 8 nuevas constelaciones en el hemisferio norte y 19 en el sur. De las del hemisferio norte conocemos en la actualidad sólo la Cabellera de Berenice y la Jirafa; el resto ha vuelto a desaparecer. La Osa Mayor, por ejemplo (compárese con la *figura 2*), ya no está abrazada por el río Jordán, vieja constelación cubierta hoy por las constelaciones de los Perros de caza, el León menor y el Lince.

En esa época empezaba a conocerse el hemisferio sur celeste. Coronelli bebió de las relaciones del navegante holandés Frederik Houtman (1571-



3. EL COMETA DEL AÑO 1661 (C 1661 C1) en el globo de Tréveris, con la mención a las observaciones de Hevelius en Danzig. Arriba aparece el cometa de 1665 (C 1665 F1), observado por Hevelius. En el centro y abajo se ve la cola del cometa C 1538 A1, todavía por identificar. Pedro Apiano midió su posición en enero de 1538. La estrella más luminosa abajo a la izquierda (III 706 ζ) es la estrella ζ Pegasi. En todas las estrellas se ven las flechas que simbolizan su precesión a lo largo de 200 años.

STERNE UND WELTRAUM/Con agradecimientos a la Sra. D. Knürr de Trier

1627) y del joven Edmond Halley (1656-1742). Las Nubes de Magallanes (la mayor y la menor) aparecen como unas constelaciones más, pese a que no son meras asociaciones de la mente fantasiosa, sino sistemas reales de estrellas. Entre las constelaciones aparece sobre el globo una banda ancha y nítida, de color marrón claro: la "*Via Lattea*".

Estrellas, nebulosas y galaxias

Este globo representa unas 2000 estrellas. Los catálogos modernos cuentan 1600 estrellas de magnitud 5 o menor y hasta 5000 de magnitud 6. (La magnitud es una medida de la luminosidad; es tanto menor cuanto mayor sea la luminosidad.) El globo de Coronelli incluye todas las estrellas de 5ª magnitud o menor. Ahora bien, mientras en el hemisferio norte figuran incluso estrellas de 6ª magnitud, en el hemisferio sur faltan algunas de las estrellas más luminosas. Por otra parte, en las constelaciones de Acuario, Piscis y la Ballena se acumulan muchas estrellas débiles, de las que Coronelli tuvo conocimiento por Johannes Hevelius, de Danzig; la mayoría sólo pueden observarse con telescopio y llevan la marca VII, correspondiente a su magnitud, ampliación natural de la antigua escala griega.

En el interior de un cartucho que lleva por título "Amico Lettore" Coronelli explica de qué catálogos ha tomado las estrellas, cuáles de Bayer, de Hevelius, de Halley, etc., y que los centros de los discos estelares se han pintado de colores diferentes según el catálogo de procedencia. En torno al punto central hay más o menos rayos conforme a la luminosidad (la magnitud) de las estrellas. Las estrellas más luminosas llevan sus nombres clásicos. En la figura 2 puede apreciarse que la mayoría de las estrellas van acompañadas de otras explicaciones. La estrella Rigel de Orión, por ejemplo, lleva el comentario "1288 β♃♄I", que significa: Rigel es la segunda estrella más luminosa de la constelación de Orión (estrella β en la *Uranometria* de Johann Bayer de 1603), es de magnitud I, porta el número 1288 en el *Epitome cosmographica* y es del tipo de Júpiter y Saturno. Las posiciones estelares están calculadas para el año 1700. Una flecha fina que cruza cada estrella indica su movimiento de precesión para el período 1600-1800.

En la época de Coronelli la observación de las estrellas variables se hallaba en mantillas. Sin embargo, los astrónomos comenzaban a percatarse de que las estrellas fijas podían sufrir grandes cambios, como demostraban las supernovas del año 1572 (la de Tycho) y de 1604 (la de Kepler). Junto a estas dos supernovas se encuentra en el globo otra "*stella nuova*", cerca de la cabeza del Cisne, en la actual constelación de la Vulpécula. En 1981 se redescubrió esa nova —en el sentido que tiene la palabra hoy— y se le dio el nombre de CK Vulpeculae. Otras estrellas variables del globo, que incluso han dando nombre a las de su clase, son Mira (o Ceti), Algol (β Persei) y P Cygni.

Unos doce objetos celestes aparecen en el globo con la denominación *nebulosa*. Entre ellos se encuentra la nebulosa del cinturón de Andrómeda, hoy conocida como galaxia M 31, el grupo de estrellas Praesepe en la constelación de Cáncer, el grupo de estrellas NGC 6441 en Escorpio y la nebulosa Tarantel en la Gran Nube de Magallanes.

Los cometas del globo celeste

El constructor de un globo celeste sólo puede inscribir los objetos que ocupan una posición fija, las *stellae fixae*. Sin embargo, Coronelli



4. TRAYECTORIA DEL COMETA 1671 C1 según la *Cometographia* de Johannes Hevelius. La línea que resalta es el ecuador celeste, entre una ascensión recta de 280º y la de 310º. Debajo del Aguila está la constelación de Antínoo, el amante del emperador Adriano, hoy inscrita en el Aguila.

STERNE UND WELTRAUM

Comparación de los elementos de la trayectoria de los cometas 1661 C1 y 2002 C1 según los cálculos de P.F.A. Méchain (1785) y Brian G. Marsden (2002)

ELEMENTOS DE LA TRAYECTORIA	COMETA 1661 C1	COMETA 2002 C1
Número de observaciones	11	899
Paso por el perihelio	Enero 1661	Marzo 2002
Distancia del perihelio	0.443 UA	0.507067 UA
Inclinación de la trayectoria	33°015	28°1207
Excentricidad	1.0	0.990043
Semieje mayor	–	50.9269 UA
Argumento del perihelio	33°450	34°6671
Longitud de los nodos	86°565	93°3698

intentó también reflejar en el suyo las apariciones de los cometas más importantes de los siglos XVI y XVII. Representó las trayectorias completas de doce cometas, con al menos algunos de los puntos donde se manifestaron otros cuatro. Las trayectorias empiezan allí donde el cometa se vio por primera vez; ese punto se marca con el símbolo de los cometas: un punto de un rojo fuerte con el centro de color plateado y una corta cola (*véanse los cometas de las figura 2 y 3*). Anotó también el nombre de su descubridor, la fecha de observación y un breve comentario. La trayectoria se marca con una línea roja. Pequeños puntos sobre la trayectoria señalan la posición del cometa en las fechas que se indican.

El cometa Halley figura tres veces. La primera corresponde a las observaciones de Pedro Apiano (1495-1552) del año 1531 (*véase la figura 2*). La trayectoria correspondiente cruza el río Jordán hacia la constelación de la Cabellera de Berenice. A continuación están las observaciones de Kepler de septiembre de 1607. La trayectoria comienza más al norte, debajo del vientre de la Osa Mayor (*véase de nuevo la figura 2*), y transcurre hacia el este (*a la izquierda*), hacia el Boyero. Finalmente, se representa la aparición del cometa en el año 1682 conforme a las observaciones de Ciampini. La trayectoria se extiende entre el Boyero y Escorpio.

Giovanni Giustino Ciampini (1633-1698) era abogado pontificio en la corte. Sin duda la política científica desempeñó aquí un papel; en la inscripción se presenta a Ciampini como *Meccenate dalla nostra Accademia*, es decir, como protector de la Academia de los Argonautas de Coronelli.

Pero la trayectoria más espectacular de las que aparecen en el globo es la del cometa de 1680-81, que adquirió especial protagonismo cuando Georg Samuel Dörfel (1643-1688) le calculó una trayectoria parabólica; 25 años después, Edmond Halley (1656-1742) descubría la trayectoria elíptica de "su" cometa y encuadraba a los cometas en el sistema solar. La trayectoria del cometa de 1680-81 empieza en la constelación de Virgo, al norte de la constelación del Cuervo, recorre dos terceras partes del globo y termina bajo el brazo izquierdo de Andrómeda.

Los cometas Ikeya-Zhang 2002 C1 y Hevelius 1661 C1

El 1 de febrero de 2002 Kaoru Ikeya, de Japón, y Daqing Zhang, de China, descubrieron en la constelación de la Ballena (Cetus) un cometa que pronto se convertiría en la aparición celes-

5. LAS MODIFICACIONES DE LA COLA del cometa 1661 C1 según las observaciones y los dibujos de Johannes Hevelius, que lo observó desde Danzig.



6. EL COMETA IKEYA-ZHANG (C/2002 C1), el 30 de abril de 2002. Puede comprobarse la similitud de esta fotografía, y la de la figura 7, con los dibujos de Helvetius del cometa 1661 C1.

STERNE UND WELTRAUM *(izquierda)*; GERALD RHEMANN Y MICHAEL JÄGER *(derecha)*/Sterne und Weltraum

te más espectacular desde el cometa Hale-Bopp 1997 (C 1995 O1).

La trayectoria de su “C 2002 C1” (el primero de los cometas descubiertos en la quincena “C”, es decir, en la primera mitad de febrero de 2002) transcurría a través de las constelaciones de Piscis, Andrómeda y Casiopea hacia el norte, hasta Cefeo; luego, más allá del Dragón, volvía hacia el sur. El 18 de marzo Ikeya-Zhang se hallaba en su perihelio, a 0,5 unidades astronómicas (una unidad astronómica es la distancia media entre la Tierra y el Sol). A finales de marzo y principios de abril podía vérsele a simple vista, con una magnitud de alrededor de 3. A finales de abril este cometa alcanzó su punto más cercano a la Tierra, a unas 0,4 unidades astronómicas. Para entonces su magnitud era casi dos unidades menor. Un par de circunstancias hacían que Ikeya-Zhang fuese digno de observación: por una parte, la estructura de su cola de iones cambiaba muy deprisa; por otra parte, dos destacados calculadores de trayectorias, Syuichi Nakano y Brian Marsden, comprendieron enseguida que la trayectoria no era parabólica. Distintos cálculos condujeron a un período de revolución de 340 años, y con ello al cometa 1661 C1, a los bibliotecarios de Tréveris y a su globo celeste.

En el globo de Coronelli el cometa de 1661 estaba situado en la constelación Pegaso (*véase la figura 3*). En este punto el globo tiene un pequeño desperfecto, aunque puede leerse el período de observación: del 3 de febrero al 28 de marzo. Coincide exactamente con las fechas entre las cuales el comerciante y regidor de Danzig Joahnnes Hevelius (1611-1687) siguió el cometa, determinó su posición y dibujó los cambios que iba experimentado la cola, tal y como lo publicó en su *Cometographia* de 1668. El comienzo de la inscripción del globo de Tréveris reza así:

Cometa oßeruata da Heuelio a Danzica dalli 3 Febbr. 1661 sino li 28 Marzo che paßando tra il Delfino e le Teste delle Aquila e del Picciolo Cauallo.

Si comparamos el globo con la carta estelar (*véase la figura 4*) que



7. EL COMETA IKEYA-ZHANG, el 7 de abril de 2002.

ALBERT JUNGER DE HAUNSBERG/NUSSDORF/*Sterne und Weltraum*

el propio Hevelius grabó —*Autor sculpsit*—, salta a la vista que Coronelli cometió un desliz: el cometa se desplaza desde el Delfín a través de la cabeza del Aguila (*teste dell Aquila*), pero luego prosigue en dirección hacia la Serpiente, no en dirección opuesta, hacia el Caballito (*picciolo Cauallo*). Coronelli ha trasladado el símbolo del cometa un poco hacia el este, a Pegaso.

También registraron las posiciones del cometa 1661 C1 otros astrónomos; así, Erhard Weigel (1625-1699) en Jena. Pero sólo las observaciones que efectuó Helvetius en once noches, entre el 3 de febrero y el 10 de marzo, le parecieron a Edmond Halley, y luego, en 1785, a P.F.A. Méchain (1744-1804), suficientemente buenas para ajustarse a una trayectoria parabólica. No bastan los viejos valores para la determinación de una trayectoria elíptica. La tabla de la página 64 compara los antiguos elementos de trayectoria y los nuevos. Como puede verse, las trayectorias se asemejan bastante. El semieje mayor *a* de 50,9 unidades astronómicas conduce, junto con la tercera ley de Kepler "simplificada" $a^3/P^2 = 1$, a un tiempo de revolución *P* de 363 años (valor que sólo toma en cuenta la influencia gravitatoria del Sol, pero no la de las demás masas del sistema solar).

Vale la pena echar un vistazo también a las modificaciones que la cola de gas ionizado fue sufriendo en la aparición de 1661. Hevelius la dibujó cada noche de observación. Grabó e imprimió esos dibujos en su *Cometographia*. Son evidentes las grandes y rápidas variaciones. Hevelius, sin embargo, no anotó la existencia, aparte de la cola iónica gaseosa, de una cola de polvo; podría haberla visto tras el paso por el perihelio de Ikeya-Zhang. El 3 de febrero de 1661 midió una longitud de cola de 6º, que fue disminuyendo las siguientes noches: el cometa se alejaba del Sol y de la Tierra. A partir del 13 de febrero la Luna fue interfiriendo la observación cada vez más, de modo que el 20 de febrero la cola ya no era visible. Hevelius observó también que el aspecto de la cabeza cambiaba continuamente. Sin embargo, las manchas claras (oscuras en el dibujo en negativo) son un producto de la fantasía. Las lagunas en la serie de fechas demuestran que no todas las noches eran claras.

El autor

Wilhelm Seggewiss trabajó en el observatorio astronómico del monte Hoher List, en el Eifel, de 1967 a 1978. En 1977 superó el examen de habilitación en Bonn, donde ejerce como profesor desde 1979.

Bibliografía complementaria

Cometographia. Johannes Hevelius. Danzig, 1668. [Johannis Hevelii Cometographia. Gedani, Auctoris Typis, & Sumptibus, Imprimiebat Simon Reiniger, Anno MDCLXVIII].

Recherches sur les comètes de 1532 et de 1661, pièce qui a remporté le prix proposé par l'Académie des sciences pour l'année 1782... par M. Méchain... (S.L.n.d.) In-4º, págs. 333-396, pl. pág. 395.

Die Montierung der Coronelli-Globen in Düsseldorf und deren Vertrieb durch Matteo Alberti. Hans Wolfgang Kuhn en *Düsseldorfer Jahrbuch*, vol. 65, págs. 17-48; 1964.

The Recovery of CK Vulpeculae (Nova 1670) – the Oldest "Old Nova". Michael M. Shara, Anthony F. J. Moffat en *Astrophysical Journal*, vol. 258, págs. L41-44; 1982.

Catalogue of Cometary Orbits. Brian G. Marsden, Greth V. Williams. International Astronomical Union, ed. 12ª, 1997.

Der Trierer Himmelsglobus Vincenzo Coronellis. Wilhelm Seggewiss en *Kurtrierisches Jahrbuch*, vol. 39, págs. 267-295, 1999.

Der Komet Ikeya-Zhang. Michel Jäger, en *Sterne und Weltraum*, págs. 52-53, junio 2002.

Pruebas toxicológicas con animales

Reducir el sufrimiento de los animales trae consigo a menudo un beneficio inesperado: conseguir ensayos más precisos y seguros

Alan M. Goldberg
y Thomas Hartung



Al Gore, cuando era vicepresidente de Estados Unidos, puso en marcha un programa para la comprobación de la toxicidad de los productos químicos. El programa supone sufrimiento y muerte para casi un millón de animales. Se ganó el aplauso de la mayoría; tendría que haberse hecho, se decía, mucho antes.

En 1997, un grupo, que ahora lleva el nombre de Defensa Ambiental, señaló que sólo se disponía de información toxicológica adecuada para una cuarta parte de las cien mil especies químicas de uso habitual. La Agencia de Protección del Medio (APM), entidad gubernamental, y el Consejo Norteamericano de Química, una asociación industrial, le dieron la razón. Gore convenció a las partes interesadas para que emprendieran pruebas de seguridad mínimas de los 2800 productos químicos que los Estados Unidos fabrican o importan en cantidades superiores a unas 400 toneladas al año. Un sitio público en la Red daría a conocer la información obtenida.

Millones de animales son sacrificados cada año en pruebas rutinarias de toxicidad. En programas futuros podrían morir muchos más. La APM ha elaborado una lista prioritaria de unos ochenta mil productos químicos sobre cuya seguridad hay que reunir información básica; además, su ambiciosa Iniciativa para la Salud de los Niños se propone examinar fenómenos sutiles, como los efectos a largo plazo de la exposición de los fetos a productos químicos. Otro proyecto aborda también los efectos neurológicos de tóxicos como el plomo, el mercurio y otros semejantes sobre la reproducción y el desarrollo.

En Europa, el programa de Registro, Evaluación y Autorización de Productos Químicos (REACH) calibrará la seguridad de treinta mil productos químicos de los que se fabrica o vende en el Viejo Continente más de una tonelada al año. En 2001, el Consejo de Investigación Médica de Gran Bretaña calculó que este programa costaría alrededor de diez millones de euros, se tardaría cuarenta años en realizarlo y sacrificaría más de trece millones de animales.



CARY WOLINSKY

En total, los programas en curso prevén utilizar cientos de millones de animales y miles de millones de dólares para determinar la seguridad de las sustancias químicas existentes. Además, cada año, la industria añade miles de productos químicos al inventario.

Los autores pertenecemos al exiguo número de científicos repartidos por todo el mundo, en la industria, en el mundo académico y en el gobierno, que desde hace décadas busca vías para resolver el conflicto entre seguridad y humanidad. El programa de Gore nos ofreció una oportunidad de mostrar nuestras soluciones. Ante una petición de Defensa Ambiental, uno de los autores (Goldberg) reunió a investigadores de las universidades Johns Hopkins, Carnegie Mellon y Pittsburgh para examinar de qué forma el programa podía conseguir sus objetivos con menos animales.

El programa consistía en recoger la cantidad mínima de información, el Conjunto de Datos Informativos de Protección, que la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) recomienda para evaluar el riesgo potencial de un producto químico. Esta batería de pruebas requiere habitualmente 430 animales por producto. Por fortuna, la OCDE, que busca armonizar los reglamentos, científicos y de otro tipo, de treinta países industriales, acepta ciertos protocolos innovadores que requieren menos animales para la obtención del conjunto de datos. Mediante el uso de la guía de la organización y rediseñando algunos protocolos para poder extraer múltiples resultados de una sola prueba, demostramos que el número de animales podía reducirse en un ochenta por ciento (a 86 animales), sin merma de información.

La ciencia de las alternativas a la investigación con animales fue tachada de amarillismo durante mucho tiempo por los movimientos de defensa de los animales: se le recriminaba esconder una apología de la investigación con animales. También fue objeto de mofa por los científicos que le afeaban una concepción sensiblera. Pero ha encontrado su lugar en ese estrecho margen donde el bienestar animal y la ciencia rigurosa resultan compatibles. Está cambiando la forma en que se desarrollan los productos químicos y biológicos y se comprueba su seguridad.

Resumen/La nueva toxicología

- Los ensayos que comprueban la seguridad de los productos químicos de uso doméstico o agrícola, entre otros, así como de los productos farmacéuticos, suelen utilizar millones de animales cada año en protocolos a menudo dolorosos.
- La aplicación de nuevos métodos, como los cultivos celulares e hísticos, las técnicas de imagen no invasivas o puras estadísticas ha reducido mucho la necesidad de pruebas con animales y el sufrimiento que causan.
- La nueva toxicología se basa en pruebas científicas de forma más rigurosa y puede ahorrar tiempo y dinero.

Reducción, refinamiento y reemplazo

Los requisitos legales para la investigación varían mucho de un país a otro. Desde 2003 no se puede vender, en la Unión Europea, un producto cosmético si, existiendo alternativas probadas, el producto final o cualquiera de sus ingredientes se han ensayado con animales. En 2009 estarán prohibidas por completo las pruebas de ingredientes cosméticos en animales.

Por el contrario, la Agencia para la Alimentación y el Medicamento, que regula los productos cosméticos en los Estados Unidos, requiere sólo que ciertos datos de seguridad estén disponibles, por si es necesario recurrir a ellos tras la comercialización del producto. Con el tiempo, ese organismo ha ido redactando directrices que determinan cómo deben tratarse las quejas acerca de la seguridad. Entre ellas se encuentra el controvertido test ocular de Draize, que aplica la sustancia de que se trate a los ojos de conejos albinos para medir la reacción subsiguiente.

Por otro lado, tanto la Agencia de Protección del Medio como sus homólogos europeos especifican el método que debe seguirse para evaluar los productos químicos de uso agrícola. Las pruebas de un pesticida duran por lo menos dos años y necesitan unos diez mil animales de varias especies. En primer lugar, se establece si el producto químico es o no absorbido por la piel, si puede inhalarse o si deja residuos en cultivos alimenticios, que terminarán por ingerirse. Con respecto a cada ruta, hay que contestar a varias preguntas referidas a individuos de edades diferentes, incluso a los fetos: por ejemplo, el período en que los individuos estarían expuestos, la cantidad de sustancia que absorberían y cómo se distribuiría por el organismo.

Si el producto no entra en el torrente circulatorio, sólo hay que preocuparse de las consecuencias de la aplicación externa. Si penetra en la sangre, hay que comprobar sus efectos y los de sus metabolitos en muchos órganos diferentes. En el procedimiento habitual, se da la sustancia a ratas, ratones, perros u otros mamíferos a lo largo de su vida y se observa si aparecen disfunciones orgánicas, cánceres u otras alteraciones. Se sigue también el comportamiento en un grupo de descendientes de estos animales. A este régimen se pueden incorporar pruebas más específicas, aunque cabe efectuarlas por separado.

Los representantes de nueve empresas multinacionales revelaron a Goldberg que las firmas utilizan placas de Petri o pruebas en animales no mamíferos, peces o gusanos habitualmente, para decidir si un producto químico resulta lo bastante seguro para fabricarlo. Sólo entonces llevan a cabo los estudios de alimentación a lo largo de la vida, para satisfacer a los abogados de las compañías y a las agencias reguladoras. (Incluimos una tabla que contiene el listado de la batería completa de pruebas en animales que se suele requerir para evaluar la seguridad de un producto químico o de un fármaco.) Las autoridades exigen las pruebas tradicionales en animales, no sólo porque algunas de las mejores alternativas son secretos industriales, sino también porque confían en ellas, ya que han venido protegiendo con satisfacción al público.

Sólo recientemente se han mostrado las instancias reguladoras más abiertas a considerar las alternativas. La

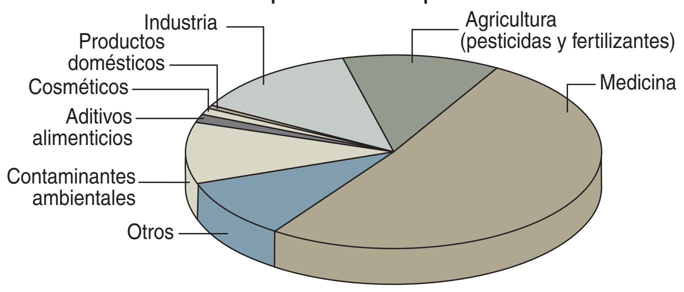
UNA CIENCIA NUEVA MADURA

	PRUEBAS TRADICIONALES DE SEGURIDAD	PRUEBAS ALTERNATIVAS
	MEDIDAS TOXICOCINETICAS de absorción, distribución, metabolismo y excreción de productos químicos. Se alimenta a los animales con un producto químico y se recoge su sangre, orina y heces, tras lo cual se los sacrifica para localizar en sus órganos el cien por cien del componente originario y los correspondientes metabolitos.	La industria ha sustituido parcialmente estas pruebas por métodos *in vitro* e *in silico*. La OCDE ha aprobado un método *in vitro* para la absorción cutánea.
	LA TOXICOLOGIA TOPICA evalúa los efectos de los productos químicos en la piel, los ojos y, a veces, en la membrana mucosa de la vagina y de la boca. Se coloca un compuesto químico en la membrana y se la examina después en busca de enrojecimiento, ampollas o corrosión.	La OCDE ha aceptado métodos alternativos para medir la corrosión, la fototoxicidad y la sensibilización; el CEVMA lleva a cabo estudios de validación para la irritación cutánea y ocular, las reacciones alérgicas y la fotogenotoxicidad.
	LA TOXICIDAD SISTEMICA AGUDA determina los efectos de la ingesta de una sustancia, una o más veces en veinticuatro horas; para ello mide sus consecuencias a los catorce días. La prueba clásica DL_{50} administra dosis diferentes de la sustancia a seis o siete grupos de animales, a fin de determinar la cantidad media necesaria para matar a la mitad. Se suele trabajar sobre 140 individuos.	La OCDE ha aprobado un método de ensayos por niveles que necesita una media de dieciséis animales. El CEVMA investiga una prueba que no necesita animales. El CEVMA y el CCIVMA están estudiando un método *in vitro* para determinar la dosis inicial para los estudios de DL_{50} que podría reducir el número de animales a seis para cada producto químico.
Sun Mon Tues Wed Thur Fri Sat 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 15 16 18	**LAS PRUEBAS DE DOSIS REPETIDA Y TOXICIDAD CRONICA** miden la incapacidad de un órgano de realizar su función normal bajo la influencia continua del producto químico. Se utilizan distintos métodos con animales. Se administran dosis múltiples durante un tiempo al organismo y se evalúa el resultado.	No se ha validado formalmente ninguna prueba. Se están utilizando la medida de funciones celulares específicas y los resultados de baterías de genes, así como técnicas no invasivas aplicadas a los animales, como la resonancia magnética, la tomografía de emisión de positrones y el escáner biofotónico.
	LA TOXICOLOGIA DEL DESARROLLO Y LA REPRODUCCION mide los efectos que tiene la exposición a productos químicos en el esperma y las gónadas femeninas, en el desarrollo fetal y en la capacidad reproductiva, así como cualquier efecto retardado tras la pubertad. Las hembras se tratan con un compuesto químico y se miden los resultados en la reproducción. Pruebas similares con machos miden su salud reproductiva.	La industria realiza estudios no invasivos en animales, así como técnicas *in vitro*; el CEVMA ha validado tres métodos de medición de la toxicidad en embriones; otros métodos se encuentran en fase de prevalidación.
	LOS ESTUDIOS DE CARCINOGENESIS Y MUTAGENESIS miden la capacidad de un compuesto químico de producir tumores. En teoría, los animales están expuestos al compuesto durante toda su vida y se evalúan los tumores resultantes: En realidad, tales estudios escasean, pues resultan muy caros.	Muchos laboratorios utilizan el Ensayo de Mutagénesis Bacteriana Ames y otras pruebas *in vitro* que observan las mutaciones en una bacteria o célula; CEVMA ha emprendido varios estudios de validación.
	LA ECOTOXICOLOGIA mide los efectos ambientales de los productos químicos. Como se efectúan desde no hace mucho tiempo, utilizan objetos de estudio “alternativos” como peces, algas o pulgas de agua.	Alemania y Suecia han aceptado un test de aguas residuales, sobre huevos de pez; el CEVMA ha validado una prueba que reduce el uso de peces en un sesenta por ciento.
	LOS TESTS BIOLOGICOS miden la calidad de las vacunas y de otros fármacos de origen biológico y comprueban la contaminación producida por toxinas bacterianas productoras de fiebre (pirógenos). Habitualmente, se administra una vacuna o un fármaco a un grupo de animales; la enfermedad de interés se introduce en ese grupo y en otro no protegido, para comparar las enfermedades resultantes.	Hoy en día se utiliza una prueba hematológica (LAL) para los pirógenos y se encuentran en fase de validación nuevas pruebas con citoquina. El CEVMA ha validado técnicas estadísticas que reducen el número de animales; ha validado también técnicas más refinadas para aliviar el sufrimiento de los animales durante los ensayos de las vacunas.

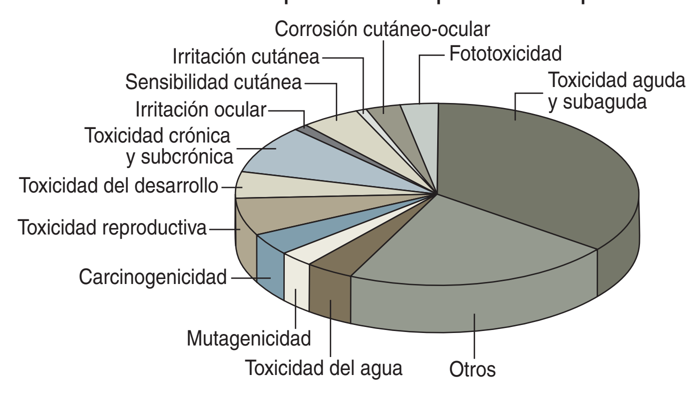
OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
CEVMA: Centro Europeo para la Validación de Métodos Alternativos
CCIVMA: Comité Coordinador entre Agencias para la Validación de Métodos Alternativos

EMILY COOPER

Uso de animales en pruebas de productos



Uso de animales en pruebas de productos químicos



1. EL NUMERO DE ANIMALES necesario para tests varía de un ensayo a otro. Casi la mitad de los animales utilizados en pruebas sirven para controlar la calidad de vacunas y otros productos medicamentosos (*arriba*). Calcular la toxicidad de una sustancia química (*abajo*) necesita un conjunto de pruebas muy específicas, entre las cuales la de toxicidad aguda se lleva la proporción más alta de animales. (Por toxicidad aguda se entiende la que resulta de la ingestión accidental de una gran cantidad de agente contaminante.) Los datos de ambos gráficos pertenecen a los quince países miembros de la Comisión Europea en 2002, que contó con diez millones setecientos mil animales ese año. No se dispone de datos semejantes para los Estados Unidos.

EMILY COOPER; FUENTE: CENTRO DE INVESTIGACIONES CONJUNTAS DE LA COMISION EUROPEA

noción misma de alternativa a las pruebas con animales se remonta a 1959, cuando William Russell y Rex Burch, de la Federación Universitaria del Reino Unido para el Bienestar de los Animales, expusieron las "tres erres" —reducción, refinamiento y reemplazo— que deberían amortiguar el sufrimiento inherente a la experimentación. Las actuales alternativas no se pueden asignar con claridad a una u otra de las tres erres, que siguen, no obstante, marcando unas pautas útiles.

Reducción remite a un diseño de experimentos que consigan la información adecuada con el menor número de animales. Sean por caso las pruebas de toxicidad sistémica aguda, que miden las consecuencias de ingerir una sustancia una o más veces cada 24 horas durante catorce días. La medida de toxicidad aguda más aceptada es la dosis letal al cincuenta por ciento o DL_{50}: la cantidad necesaria de una sustancia para matar a la mitad de los animales de experimentación. Para determinar la dosis letal, los investigadores administran una cantidad determinada del producto químico a cada animal de un grupo de diez machos y diez hembras. Después de hacer lo mismo con seis o siete de tales grupos, cada uno de los cuales recibe dosis diferentes, se cuentan las muertes ocurridas.

Poco a poco fue pareciendo que esta prueba resultaba excesiva y se diseñaron protocolos más eficaces. Desde 1989, un uso más refinado de la estadística ha permitido obtener DL_{50} con 45 animales. Hoy, la OCDE acepta un protocolo que mide la dosis letal con un promedio de dieciséis animales. Un estudio reciente, llevado a cabo a ambos lados del océano, permite augurar que en un futuro la cifra bajará a unos seis animales para cada sustancia química.

Las técnicas de imagen no invasivas que se emplean en medicina —rayos X, resonancia magnética nuclear y tomografía por emisión de positrones— distinguen entre el estado normal de un órgano y un espectro amplio de patologías. Merced a esas técnicas, podemos seguir el desenvolvimiento de un animal en el transcurso del ensayo. Se trata de una alternativa al procedimiento tradicional: empezar con un grupo de animales y matar a uno en cada fase para determinar el estado del órgano de interés. Las imágenes permiten controlar mejor los datos y reducen la utilización de animales en tales experimentos en alrededor de un ochenta por ciento.

Otra técnica de imagen más llamativa, la biofotónica, creada por Christopher H. Contag y Pamela R. Contag, de la Universidad de Stanford, cae de plano en la R de refinamiento. Por tal hemos de entender el diseño de experimentos que implican un menor sufrimiento animal. Por ejemplo, un investigador agrega el gen de la enzima *luciferasa* en el genoma de una célula cancerosa; luego, introduce la célula en un animal.

La enzima aporta la capacidad de producir luz "fluorescente" y hace que la célula cancerosa y su progenie brillen. Los fotones, mensurables con los instrumentos pertinentes, permiten seguir el crecimiento del cáncer bajo la influencia de diversos agentes químicos y farmacéuticos, mucho antes de que el animal haya desarrollado un tumor palpable. Este procedimiento elimina el dolor y el malestar y puede adaptarse al estudio de numerosas enfermedades en su fase inicial.

Otro valioso refinamiento, especialmente útil en pruebas de vacunas, implica definir un "punto final humano": un estudio que causa dolor termina en cuanto se obtienen datos relevantes. Por ejemplo, si la temperatura corporal de un animal cae por debajo de cierto valor, no se recupera ya; la prueba puede detenerse entonces sin que se pierdan datos, ahorrando al animal una larga agonía. Si un animal vacunado contra la rabia e infectado con el virus empieza a dar vueltas, no habrá duda de que la vacuna no ha hecho efecto; se podrá sacrificar al animal evitándole horas de sufrimiento. Incluso cabe hacer algo mejor: se puede comprobar la eficacia de muchas vacunas midiendo los niveles de anticuerpos, tras haber infectado al animal, en vez de esperar a que aparezcan signos de la enfermedad. El refinamiento exige también usar fármacos y anestésicos que reduzcan el dolor y el malestar.

Un nuevo tipo de refinamiento consiste en sustituir los animales de experimentación habituales por especies menos desarrolladas en la escala evolutiva, confiados en

que sufren menos. En los últimos años se ha venido generalizando el uso del pez cebra y el nemátodo *Caenorhabditis elegans* para observar la alteración del sistema nervioso bajo la influencia de agentes químicos. Se ha establecido en ambas especies la función de todos los genes esenciales: si un agente químico activa o desactiva un gen, se sabe de qué manera afectará a la producción de proteínas y al metabolismo celular. Bañando un grupo de genes con un agente químico (un chip de entre dos y cinco centímetros que contenga los nueve mil genes importantes de un pez cebra) puede verse a cuáles de ellos activa el producto.

Más recientemente, algunas compañías han empezado a fabricar chips de genes humanos que incluyen los que, según se cree, controlan la respuesta celular a la toxicidad. Esta técnica, que alcanzará en un futuro su pleno desarrollo, pues la interpretación del mensaje del chip entraña todavía imponentes dificultades, ejemplifica la R más atractiva: el reemplazo.

La tercera R

Reemplazo significa aquí la absoluta eliminación de los animales en los ensayos. En su mayoría, las alternativas de este tipo no deben su existencia a un sentimiento desbordante de humanidad, sino al enorme progreso general en técnicas baratas, rápidas y eficaces. A modo de botón de muestra: los análisis de hormonas, como la prueba del embarazo, que en su momento llevaban mucho tiempo y necesitaban animales vivos, se realizan ahora con métodos alternativos (químicos o inmunológicos).

Un ejemplo precoz de reemplazo fue el descubrimiento casual en los años setenta de una opción alternativa al test pirógeno por parte de Henry Wagner, de la Universidad Johns Hopkins. Ese test comprobaba la presencia de contaminantes bacterianos productores de fiebre, mediante la inoculación de una sustancia en conejos, cuya temperatura se tomaba veinticuatro horas después. Wagner había desarrollado radioisótopos de vida muy corta como medio de diagnóstico por imagen en los seres humanos. Necesitaba asegurarse de que se hallaran exentos de toxinas bacterianas; pero los radioisótopos se inactivarían para cuando el test del conejo suministrase los resultados. Wagner sabía que Frederick Bang, también de la Johns Hopkins, había demostrado que la hemolinfa del cangrejo de herradura reaccionaba, de forma predecible y mensurable, frente a la mayoría de las toxinas bacterianas más importantes. La FDA autorizó el uso de este "lisado de amebocito *Limulus*" o LAL, como prueba para detectar pirógenos.

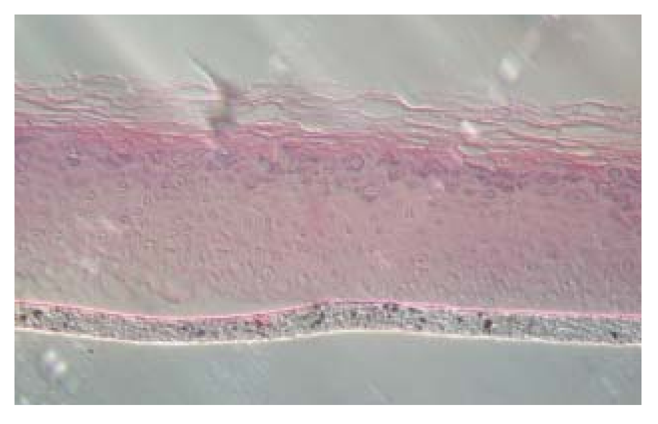
Albrecht Wendel, de la Universidad de Constanza, y uno de los autores (Hartung) demostraron que las toxinas bacterianas pueden detectarse en virtud de su cierta propiedad: su capacidad de promover que los leucocitos de la sangre humana liberen citoquinas, algunas de las cuales envían una señal al cerebro para que provoque la fiebre. Basta comprobar la presencia de esas proteínas en la sangre humana para descubrir la presencia de todas las toxinas relevantes, con lo que se superan algunas de las limitaciones del test LAL.

En cambio, ciertos reemplazos, como el del test de Draize, muy doloroso para los conejos, pues el ojo es un órgano sensible, sólo se han encontrado cuando se ha buscado de un modo deliberado el bienestar de los animales. Hace diez años, algunos investigadores empezaron a realizar el test en globos oculares frescos procedentes de conejos vivos. Esa estrategia eliminó el dolor y el tener que recurrir a animales vivos. En Alemania, la fina membrana que separa la yema de un huevo de gallina de la clara sirve a menudo como sustituto de la córnea en estas pruebas.

En los años ochenta, el Centro Johns Hopkins de Opciones Alternativas a las Pruebas en Animales, que dirige Goldberg, financió líneas de investigación sobre la manera en que los diversos agentes químicos afectan a cultivos hísticos bidimensionales de células corneales humanas. Basándose en parte en trabajos de ese tenor, algunas compañías han fabricado tejidos tridimensionales que remedan las superficies externas del ojo humano. Permiten comprobar, amén de la irritación, sutiles cambios estructurales.

A estas alturas, podemos ya cultivar células humanas de la piel, los pulmones, los ojos, los músculos, las membranas mucosas y otros órganos. Resultan impresionantes los éxitos logrados en la regeneración de tejidos: construcciones tridimensionales de células especializadas cultivadas sobre un sistema de soporte. Se aplican ya al caso del ojo, la piel, los pulmones, el tracto gastrointestinal y las mucosas de la boca y de la vagina. Han sustituido a los animales en numerosas pruebas, aunque se echa en falta un cultivo tridimensional del hígado.





MATTEK

2. LA PIEL SINTETICA puede sustituir al lomo afeitado de conejos vivos en las pruebas de corrosión de una sustancia determinada. Esta "piel" comercial ha estado en contacto con agua (*arriba*) y con un álcali (*abajo*) durante tres minutos.

Y lo que reviste mayor interés: gracias a los cultivos celulares e hísticos se observan los mecanismos por los que actúan los agentes químicos, algo imposible en el animal, y se reconstruye *in vitro* la serie de procesos bioquímicos que inician. En el futuro se predirán así las consecuencias funcionales (alteraciones genéticas, cambios en el crecimiento celular, etcétera) que provoca la exposición de una célula del cuerpo humano a un producto químico. Los cultivos hísticos múltiples en cámara única, sistema elaborado hace poco por AP Research en Baltimore, reproducen interacciones tan complejas como la transformación de un producto químico en otro por la actividad metabólica de un órgano, que a su vez afecta a otros órganos. Todos estos avances, todavía en sus primeras etapas, permitirán prescindir de los animales en los ensayos toxicodinámicos: la investigación de la cadena de sucesos que distribuyen, metabolizan y excretan una sustancia química.

Probablemente, en última instancia los reemplazos no serán tanto *in vitro* como *in silico*. La industria farmacéutica opera ya con modelos informáticos de la interacción de los sistemas orgánicos para estudiar el efecto de los fármacos. Charles DeLisi, de la Universidad de Boston, y otros investigadores buscan promotores para el Proyecto del Ser Humano Virtual, proyecto futurista de computación distribuida (compartida por varios ordenadores) y semejante en escala al Proyecto Genoma Humano. El ser humano virtual podrá algún día simular la reacción humana a estímulos biológicos, físicos y químicos, con lo que no serán necesarios los ensayos con animales.

Convencer a los escépticos

El descubrimiento de nuevas opciones alternativas constituye todavía un proceso irregular e incierto. El Programa Nacional de Toxicología, que coordina los programas de comprobación de productos tóxicos del gobierno federal junto con los Institutos Nacionales de Ciencias Ambientales de la Salud, proporciona la mayoría de los fondos gubernamentales para los programas alternativos. En los últimos diez años, los organismos gubernamentales de los Estados Unidos no han invertido siquiera diez millones de dólares en comprobar la validez de los programas alternativos para regular su uso. La Unión Europea, en cambio, ha gastado alrededor de trescientos millones de euros durante el mismo período en métodos alternativos y en estudios para su validación. Ciertos países han invertido por su cuenta millones (Alemania unos cien) en la búsqueda de métodos alternativos.

La eficacia de cualquier nuevo método alternativo debe comprobarse antes de que los organismos reguladores puedan aceptarlo. En los Estados Unidos, el Comité Coordinador entre Agencias para la Validación de los Métodos Alternativos (CCIVMA), integrado por representantes de quince agencias federales, nombra grupos de expertos independientes para que revisen la bibliografía generada, incluidos los protocolos suministrados por los fabricantes, a fin de asegurar la validez de una prueba. En función de su mandato regulador, cada agencia, de forma independiente, decide si acepta o no la prueba. Desde sus comienzos en 1997, el CCIVMA ha evaluado dieciséis métodos alternativos, seis de los cuales han sido adoptados por las autoridades reguladoras, mientras que los otros son objeto de mejoras recomendadas por el Comité. Antes, pasaba una década o más para que una prueba ya admitida fuera adoptada de forma general, pero desde que el CCIVMA comenzó a actuar este retraso se ha reducido considerablemente.

Como se empezó a hacer en Europa, la validación de un método alternativo se asemeja, por sus fundamentos y su complejidad, a los ensayos clínicos. A imagen de éstos, que se basan en los resultados y necesitan demostrar que un fármaco es eficaz, los ensayos de validación han de demostrar que una prueba alternativa hace el trabajo para el que se la ha concebido. El concepto de validación científica ganó un amplio consenso internacional en la reunión de la OCDE de Solna, en Suecia, en 1996. De acuerdo con los Principios de Solna, el Centro Europeo para la Validación de los Métodos Alternativos (CEVMA), y también el CCIVMA, llevan a cabo una serie de estudios de "prevalidación" para asegurar el potencial de un método alternativo y eliminar fallos en su protocolo.

En Europa, si se pasa la prueba, el CEVMA organiza varios laboratorios en diferentes países, cada uno de los cuales somete sustancias codificadas al test alternativo. Treinta y cinco científicos, representantes de los veinticinco países miembros, la Comisión Europea, asociaciones académicas, la industria y grupos defensores de los animales, evalúan los resultados del ensayo; el CCIVMA está presente como observador. Si un método alternativo resulta capaz de medir de forma fiable las principales propiedades de las sustancias, el comité lo declarará válido.

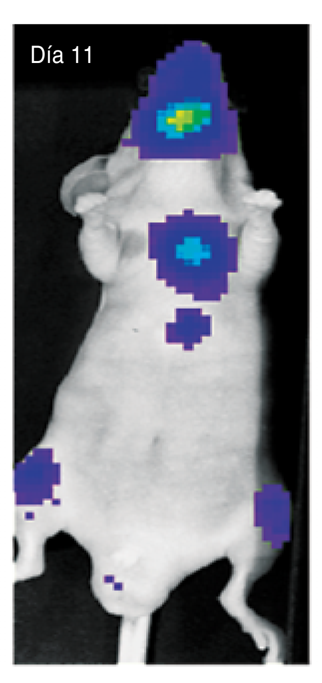
En un ensayo reciente de validación, diez laboratorios dedicaron tres años a estudiar seis métodos alternativos

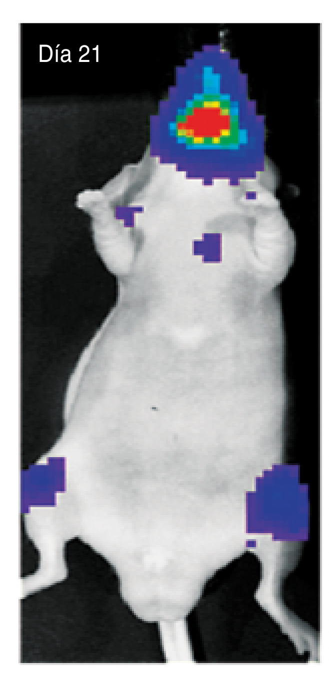


3. LOS LEUCOCITOS liberan unas proteínas, las citoquinas, en presencia de bacterias que producen fiebre. Un sencillo test de citoquinas aplicado a la sangre de un paciente permite detectar esas bacterias "pirógenas"; reemplaza a las pruebas sobre conejos y a otras estrategias anteriores.

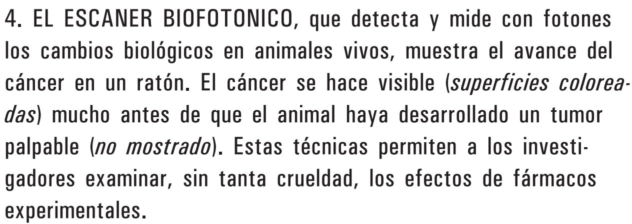
EYE OF SCIENCE, REUTLINGEN, ALEMANIA; CORTESIA DE THOMAS HARTUNG










4. EL ESCANER BIOFOTONICO, que detecta y mide con fotones los cambios biológicos en animales vivos, muestra el avance del cáncer en un ratón. El cáncer se hace visible (*superficies coloreadas*) mucho antes de que el animal haya desarrollado un tumor palpable (*no mostrado*). Estas técnicas permiten a los investigadores examinar, sin tanta crueldad, los efectos de fármacos experimentales.



al test pirógeno. Ratificaron su capacidad de descubrir las sustancias productoras de fiebre en ciento noventa muestras sin identificar. Desde su creación en 1991, el CEVMA ha validado diecisiete métodos alternativos; nueve más se encuentran en la última fase de evaluación —la revisión por pares— y otros veinticinco se hallan en fase avanzada de análisis o ensayos. Según la legislación actual, un método alternativo debe utilizarse en Europa en cuanto haya sido validado, pero en la práctica suele haber retrasos de varios años. Pero, conforme los reguladores europeos se acostumbren a los nuevos métodos, los aceptarán con mayor rapidez.

Los esfuerzos por encontrar reemplazos sufrieron su mayor retraso a principios de los años noventa, cuando fallaron seis ensayos ambiciosos de validación de métodos alternativos al test ocular de Draize. Los resultados dejaron perplejos a los investigadores, ya que se los había estado utilizando sin aparentes problemas en la industria cosmética. Tras haber revisado los datos, ahora sabemos por qué fallaron: sus resultados se compararon con los del propio test de Draize; pero ahora consta que éste da muchos falsos positivos. Actualmente, el CCIVMA y el CEVMA revisan juntos la información existente sobre el test de Draize y sus alternativas. El estudio será la base de un informe de validez o, si fuera necesario, de otro ensayo de validación de métodos alternativos al Draize. Esta vez confiamos en tener éxito.

Los métodos alternativos ideados por la ciencia pueden llegar a reducir en buena medida el recurso a los animales. Estimaciones de fuentes académicas e industriales coinciden en que los métodos alternativos existentes disminuirían el número de animales necesario para el programa europeo REACH en un setenta por ciento; es muy probable que se dé una cifra similar en la lista prioritaria de la Agencia de Protección Ambiental. O visto de manera más prosaica: los métodos alternativos pueden ahorrar millones y, posiblemente, miles de millones de euros y reducir años, si no decenios, de ensayos, sin merma en la calidad de la información suministrada. La nueva ciencia, pues, protegería mejor no sólo a los animales a los que quiere ayudar, sino también a nosotros mismos.

Los autores

Alan M. Goldberg y **Thomas Hartung** son toxicólogos empeñados en la búsqueda de métodos de ensayo alternativos. Goldberg, doctor en farmacología por la Universidad de Minnesota, enseña toxicología en la Universidad Johns Hopkins, en donde dirige el Centro para Pruebas Animales Alternativas. Hartung es doctor en farmacología bioquímica por la Universidad de Constanza y doctor en toxicología por la de Tubinga. En la actualidad dirige el Centro Europeo para la Validación de Métodos Alternativos.

Bibliografía complementaria

ANIMALS AND ALTERNATIVES IN TESTING: HISTORY, SCIENCE AND ETHICS. Joanne Zurlo, Deborah Rudacille y Alan M. Goldberg. Mary Ann Liebert, 1994.

TENDENCIAS DE LA INVESTIGACIÓN ANIMAL. Madhusree Mukerjee en *Investigación y Ciencia*, págs. 74-83; abril, 1997.

TO 3R IS HUMANE. Alan M. Goldberg y Paul A. Locke en *Environmental Forum*, págs. 19-26; julio/agosto 2004.

Biopelículas

Los avances en el conocimiento de estas comunidades microbianas están desencadenando una revolución que puede transformar la microbiología

Joe J. Harrison, Raymond J. Turner, Lyriam L. R. Marques y Howard Ceri

Cuando pensamos en las bacterias, imaginamos un medio acuoso con organismos unicelulares en suspensión. Seres solitarios que se reúnen de vez en cuando con sus congéneres para provocar una enfermedad o estropear un alimento, pero regresan a su retiro individual terminada la tarea.

Pero semejante descripción de la vida bacteriana no sólo peca de simplista. Es errónea. En la naturaleza, la mayoría de los microorganismos medran en grupos formados por muchedumbres, que se adhieren a una superficie. En vez de vivir como ermitaños solitarios en la forma planctónica, la mayoría de las bacterias pasan su vida en una biopelícula.

En su estado maduro, una biopelícula constituye una estructura fascinante. Forma tapices, agregados, promontorios o incluso microcolonias de mayor complejidad que generan formaciones con aspecto de tallo o champiñón. Los habitantes de la película pueden pertenecer a una misma especie o a diversos grupos de microorganismos distribuidos en varias barriadas. Su nexo común es una matriz de polisacáridos, ADN y proteínas, que constituyen una *sustancia polimérica extracelular*, la mucosidad.

La vida en comunidad les ofrece ventajas notables. La proximidad física de otras células favorece las interacciones sinérgicas, incluso entre miembros de especies distintas: transferencia horizontal de material genético entre microorganismos, utilización conjunta de subproductos metabólicos, mayor tolerancia a los antimicrobianos, amparo ante los cambios del entorno y protección frente al sistema inmunitario de un huésped infectado o frente a depredadores. La formación de una biopelícula se ha llegado a comparar con el programa de diferenciación celular que opera en un organismo pluricelular.

El reconocimiento de la importancia de los tapices bacterianos constituye un fenómeno reciente. Desde hace un par de decenios se viene investigando la fisiología de estas comunidades. Lo que no deja de resultar sorprendente, habida cuenta de que el microscopista holandés Antonie van Leeuwenhoek descubrió las biopelículas a finales del siglo XVII. Había intentado matar un tapiz bacteriano (la placa dental de su propia dentadura postiza) mediante ácido acético, pero se dio cuenta de que se destruían sólo las células que flotaban libremente. A pesar de ese hallazgo precoz de las comunidades microbianas, la ciencia se desentendió de tales observaciones para centrarse en las bacterias planctónicas.

Por supuesto, no todos los expertos coinciden en que las biopelículas constituyen la organización bacteriana predominante en la naturaleza. La mayoría de las técnicas microbiológicas disponibles examinan microorganismos cultivados en su estado planctónico. Pero estamos asistiendo a un cambio en nuestra concepción de las bacterias. Se vislumbra una nueva perspectiva de la vida microbiana que tendrá consecuencias fundamentales para la medicina, la industria, la ecología y la agricultura.

Tapices microbianos en todas partes

¿Quién no ha resbalado nunca sobre la capa viscosa que recubre las rocas de un río o de un arroyo? La mucosidad en cuestión corresponde a una biopelícula integrada por bacterias, hongos y algas. Se forma a partir de la colonización bacteriana de la superficie de la roca. Estos microorganismos producen una sustancia polimérica extracelular que, al estar dotada de carga electrostática, atrapa partículas de alimento, arcilla y otros minerales. La materia atrapada en la mucosidad crea nichos microscópicos, dotado cada uno de un microentorno distinto. Merced a ello, los microorganismos que presentan sus propias necesidades individuales se agrupan y tejen un consorcio microbiano diversificado.

La matriz de una biopelícula se considera un *hidrogel*, un polímero complejo hidratado, cuyo contenido acuoso supera con creces su propio peso en seco. Las características de hidrogel confieren a la mucosidad fluidez y elasticidad suficientes para que ésta soporte los cambios en el efecto de cizalladura que provoca el fluido circundante. Por eso los tapices microbianos suelen formar filamentos (hilillos pegajosos compuestos por microorganismos amarrados a una superficie). Conforme el agua fluye sobre la biopelícula, algunos fragmentos pueden desprenderse y, por tanto, propagar la comunidad microbiana aguas abajo. Se cree que ésta es la forma en que las bacterias colonizan los pulmones de los pacientes sometidos a respiración asistida; provocan una neumonía que resulta fatal para los pacientes en estado crítico.

La extraordinaria capacidad de propagación de los microorganismos explica que las biopelículas se formen en los lugares más insospechados. La quilla de acero de un barco en alta mar se recubre de biopelículas que

CORTESIA DEL SERVICIO DEL PARQUE NACIONAL DE YELLOWSTONE/*American Scientist*









1. EL PARQUE NACIONAL DE YELLOWSTONE rebosa vida microscópica, incluidas algas termófilas (*abajo, a la derecha*) y bacterias filamentosas. Las biopelículas que forman estos organismos resultan familiares a todos, pero se sabe poco acerca de ellas. A pesar de que el descubrimiento de los tapices microbianos se remonta hasta el siglo XVII, los expertos han centrado su atención en las formas solitarias (planctónicas) de los microorganismos. En la naturaleza, sin embargo, la mayor parte de los microorganismos medran agrupados en comunidades adheridas sobre una superficie, una forma de vida que afecta profundamente a su interacción con otros organismos y a su resistencia patogénica. Nuevos estudios sobre biopelículas quizá cambien el rumbo de la investigación microbiológica: prometen el control de las infecciones provocadas por bacterias y otros microorganismos.

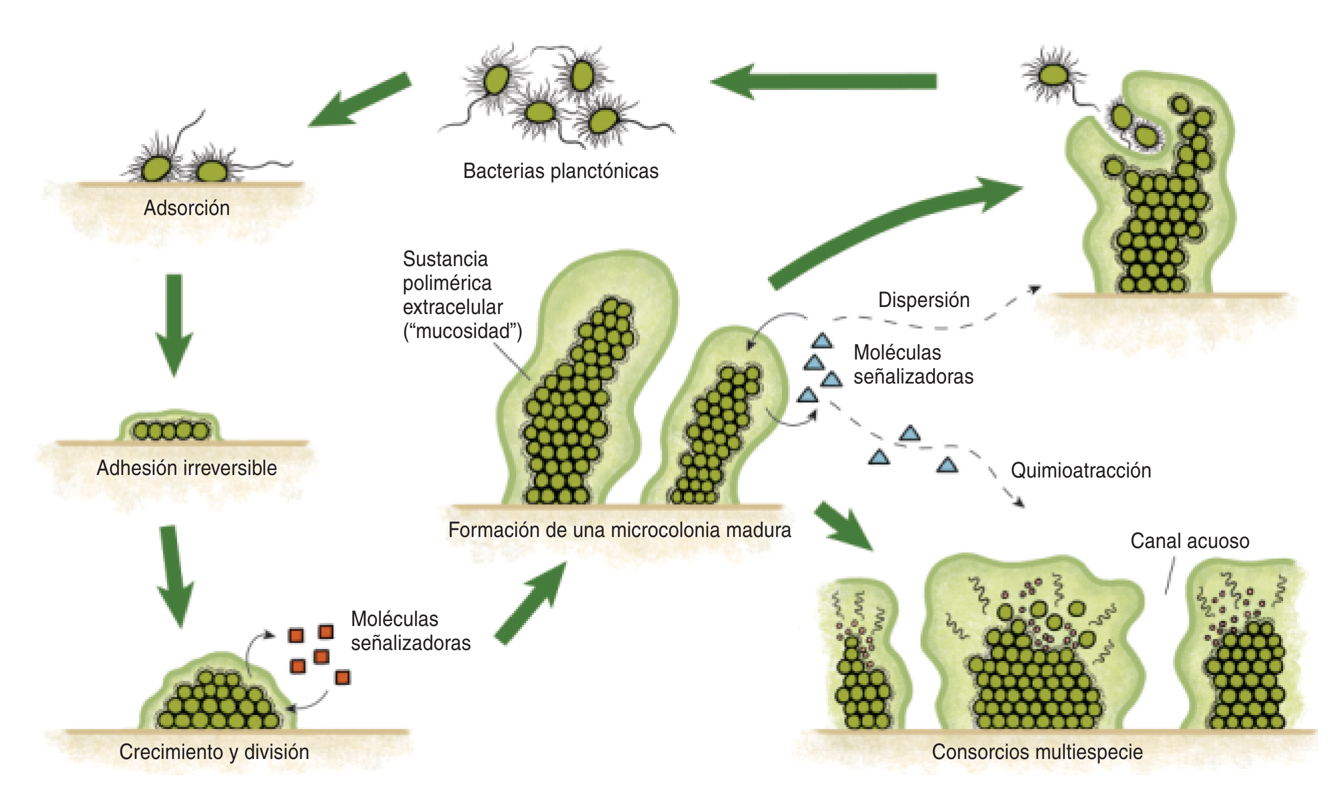
incrementan la resistencia del buque y afectan, por tanto, a su velocidad. Otras biopelículas causan estragos en la industria petrolífera al promover la corrosión de los metales y reducir el tiempo de vida de los oleoductos.

Algunas biopelículas, formadas por *Archaea*, línea ancestral de procariotas (organismos carentes de núcleo), sobreviven incluso en los ambientes hidrotérmicos hostiles de manantiales termales y fumarolas volcánicas submarinas. La arqueobacteria *Pyrodictium* prolifera en el fondo del mar; forma una película mohosa que recubre los cristales de sulfuro en el ambiente oscuro y anaerobio de una fumarola submarina, donde las temperaturas pueden superar los 110 grados Celsius.

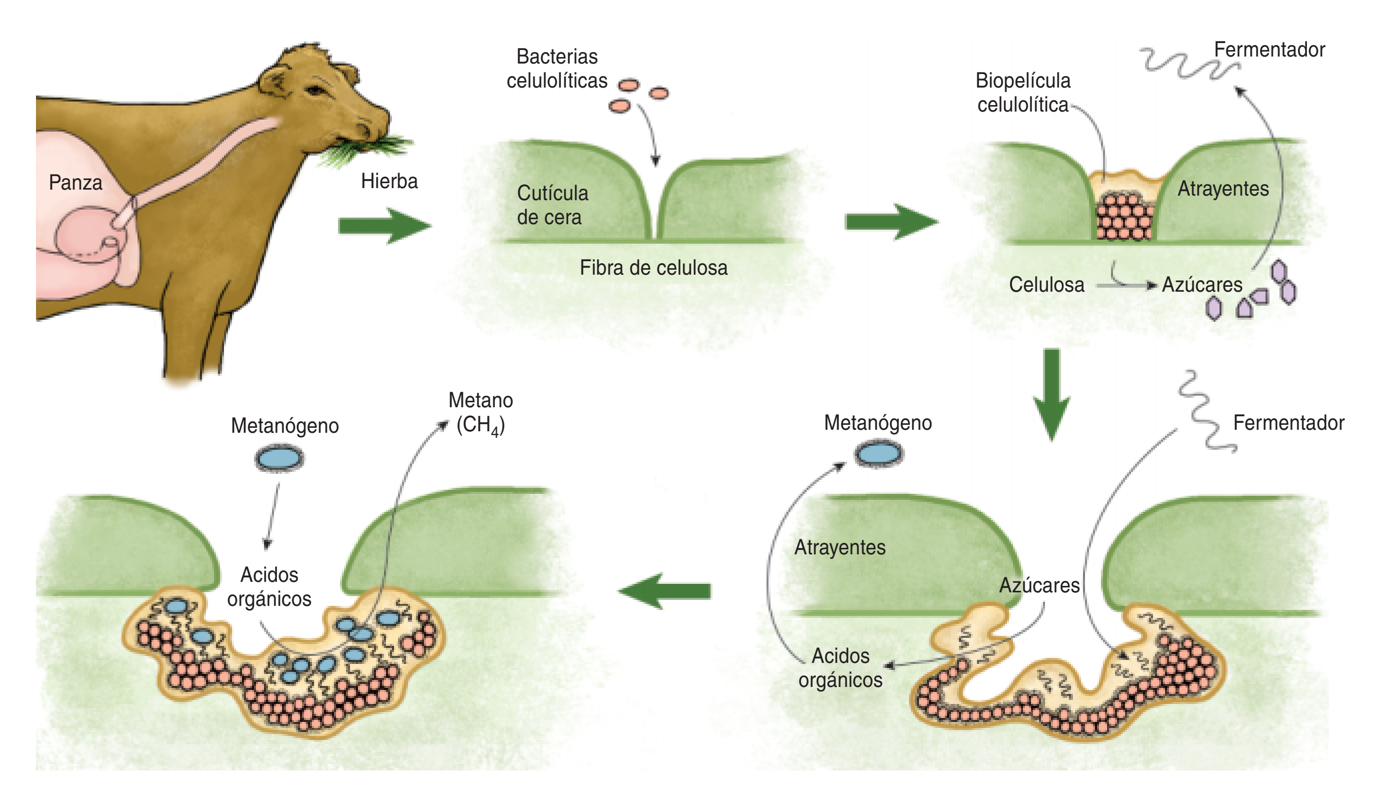
La tripa de la vaca constituye quizás uno de los entornos más extraordinarios donde medran estas comunidades microbianas. Las biopelículas forman parte del complemento microbiano de numerosos animales sanos, pero la presencia de comunidades bacterianas en los rumiantes ofrece un valioso ejemplo de las interacciones que se desarrollan en el seno de una película.

Empecemos por la *panza*, el compartimento de mayor tamaño del estómago bovino: tiene una capacidad de más de 150 litros. Contiene tantos microorganismos, que los microbiólogos se refieren a las vacas como "fermentadores móviles". Las bacterias colonizan el tracto digestivo de una ternera a los dos días de su nacimiento. En tres semanas, los microorganismos han modificado la química del interior de la panza, que en poco tiempo se convierte en el hogar de al menos 30 especies de bacterias, 40 especies de protozoos y 5 de levaduras. Las células de esta biopelícula proliferan en la capa mucosa del estómago y se alimentan de la comida que el animal ingiere. Las vacas comen hierba; ésta se compone principalmente de celulosa, un hidrato de carbono complejo que las enzimas digestivas de los mamíferos no degradan. Pero la celulosa constituye un combustible perfecto para las bacterias del tapiz: la convierten en una biomasa microbiana que, a su vez, aporta a la vaca las proteínas, lípidos e hidratos de carbono que necesita.

El núcleo de este proceso se halla en un ecosistema microscópico que se forma en la panza, cuando una bacteria planctónica pionera (de la especie *Ruminococcus flavefaciens*, por ejemplo) accede a las partes internas de una hoja, quizás una que se haya roto al ser masticada por la vaca. Estas bacterias se adhieren a la celulosa de las capas internas de la hoja y forman una biopelícula rudimentaria. Liberan entonces enzimas celulolíticas que producen azúcares sencillos y subproductos metabólicos que atraen a otras bacterias: fermen-



2. LA FORMACION DE UNA BIOPELICULA remeda el desarrollo de un organismo pluricelular. Las señales intercelulares regulan el crecimiento y la diferenciación. Una biopelícula típica se forma (*siguiendo las flechas a partir de la esquina superior izquierda*) cuando las bacterias planctónicas que nadan libremente en suspensión se adsorben sobre una superficie biótica o inerte (una asociación, al principio reversible, que luego se torna irreversible). La adsorción desencadena los primeros cambios fisiológicos que conducen al estilo biológico de película. Conforme las bacterias crecen y se dividen, las células intercambian señales moleculares que aportan información sobre la densidad poblacional celular (proceso de "percepción del quórum"). En una colonia madura, los microorganismos producen una sustancia polimérica extracelular, una matriz de polisacáridos, ADN y proteínas que engloba la estructura de la microcolonia. Las células planctónicas pueden abandonar la biopelícula para establecer nuevas biopelículas. Determinadas señales procedentes del grupo pueden reclutar nuevas especies microbianas para que se unan al consorcio.



3. UNA BIOPELICULA FORMADA POR VARIAS ESPECIES en la panza de una vaca constituye un ejemplo de las intrincadas relaciones que se establecen entre las células de una comunidad microbiana, por no hablar de la función que desarrollan las biopelículas en la nutrición de los rumiantes y otros animales. La colonia comienza con bacterias celulolíticas, que digieren la hierba ingerida por el rumiante. (En la vaca, el bolo alimenticio se desplaza varias veces desde su boca hasta la panza antes de pasar al resto del estómago y al intestino.) Los monosacáridos y disacáridos sencillos producidos por estas bacterias atraen a microorganismos fermentadores, que convierten los azúcares en ácidos orgánicos. Luego, los ácidos orgánicos atraen a microorganismos metanogénicos, que se incorporan a la biopelícula. En condiciones normales, los ácidos orgánicos que no son neutralizados por la saliva de la vaca inhibirían el crecimiento ulterior de la biopelícula, pero los metanógenos convierten estas moléculas en metano. Se produce así una masa microbiana rica en proteínas que la vaca puede digerir; aporta el grueso de los nutrientes del animal.

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

tadoras anaeróbicas como *Treponema byrantii*, espiriforme, que se alimenta de azúcares y produce ácido acético y ácido láctico.

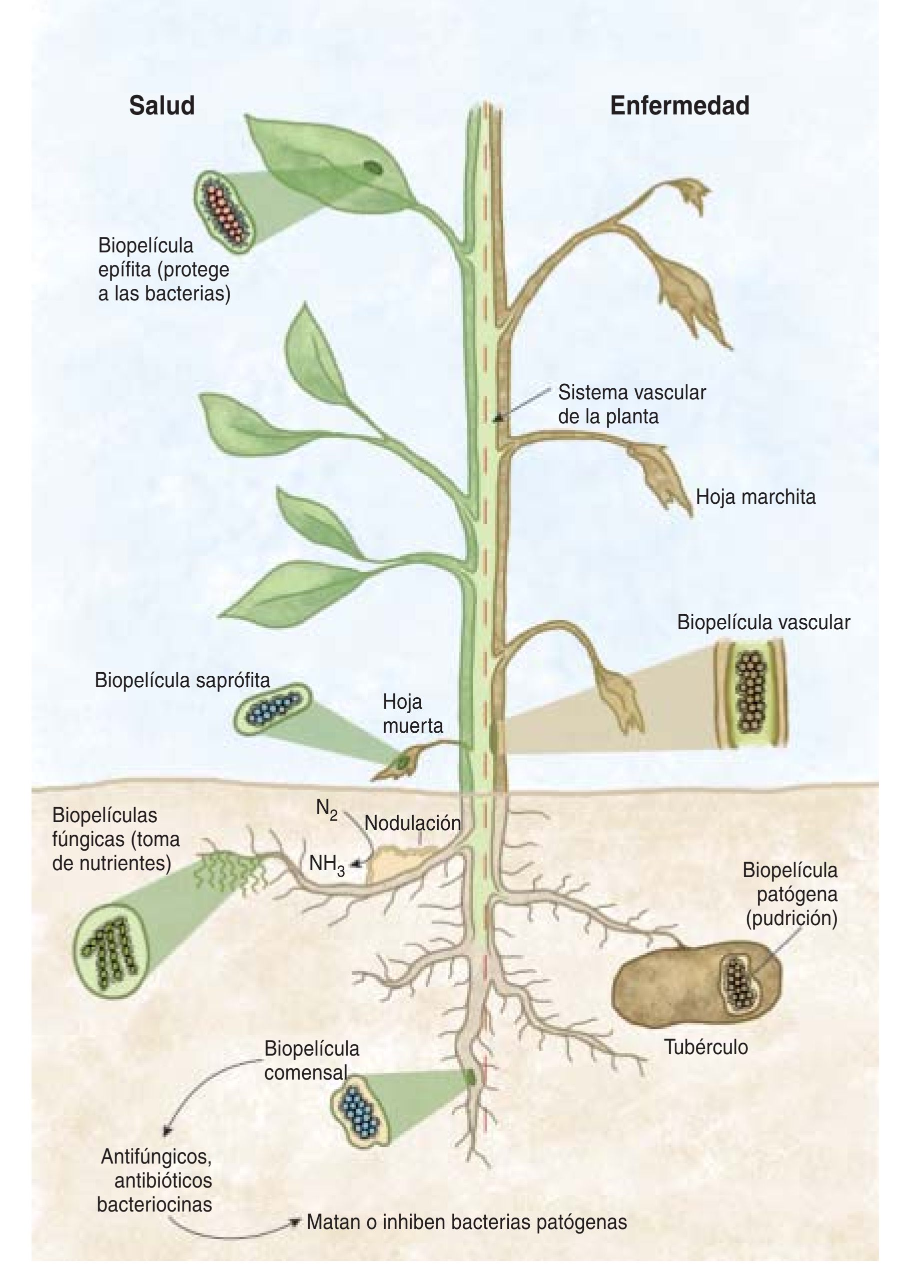
En condiciones normales, los metabolitos ácidos frenan el crecimiento bacteriano mediante un mecanismo de retroinhibición, pero da la casualidad que otros microorganismos se unen a la comunidad de la biopelícula y se alimentan de los ácidos orgánicos. Se trata de los *metanogénicos*, arqueobacterias cuya actividad acelera el crecimiento de la comunidad bacteriana e impide la retroinhibición.

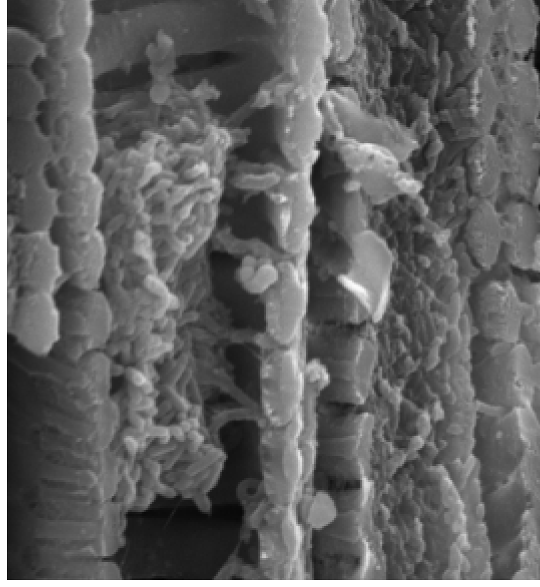
Como su nombre indica, los metanogénicos producen metano; aquí, en grandes cantidades. Entre un 15 y un 25 por ciento de la emisión global de metano (que supone un total de 7,5 millones de toneladas al año) puede atribuirse a flatulencias de los rumiantes. Dado que el metano retiene el calor en la atmósfera, la biopelícula que se encuentra oculta en el estómago de una vaca puede desempeñar un papel nada despreciable en el cambio climático global.

Los animales no son los únicos seres vivos que albergan a las biopelículas. Desde los años sesenta del siglo pasado se han identificado colonias microbianas en plantas tropicales y en frutas y verduras de venta en supermercados. Sin embargo, hasta el pasado decenio no se utilizó el término *biopelícula* para describir el crecimiento bacteriano sobre la superficie de una planta. Estas biopelículas aportan a la célula individual protección contra varios factores de estrés ambiental (radiación ultravioleta, deshidratación, lluvia, cambios de temperatura, viento y humedad), así como otras ventajas. Incrementan también la resistencia de un microorganismo a las defensas del huésped o a sustancias antimicrobianas producidas por microorganismos competidores.

Plantas y tapices microbianos se relacionan de múltiples formas. En ciertos casos, la planta opera de mero soporte mecánico; la biopelícula viene a ser, entonces, un epífito inofensivo. En otros, la planta aporta nutrientes a los microorganismos; pensemos en los saprófitos, que se alimentan de la materia vegetal en descomposición; éstos tampoco suponen un peligro para la planta. Sí surgen problemas cuando las poblaciones de epífitos dotadas de capacidad genética para iniciar una interacción patógena con el huésped crecen y desbaratan los mecanismos de defensa del huésped. Luego, las células de la biopelícula coordinan la liberación de toxinas y enzimas que descomponen los tejidos de la planta. Lo que comenzó como una relación inocua acaba convirtiéndose en una enfermedad.

También en el subsuelo, plantas y biopelículas pueden entablar relaciones complejas. *Pseudomonas fluorescens* coloniza las raíces y protege a las plantas de los patógenos mediante la producción de antibióticos que





4. LAS RELACIONES ENTRE PLANTAS Y BIOPELICULAS abarcan un amplio espectro: de saludables (*arriba, izquierda*) a patógenas (*arriba, derecha*). Muchas biopelículas son inofensivas. Los saprófitos simplemente digieren hojas muertas; los epífitos utilizan la planta como mero soporte mecánico. Algunas interacciones pueden incluso resultar beneficiosas: los nódulos subterráneos repletos de bacterias permiten que una planta fije el nitrógeno; ciertos tapices fúngicos proporcionan a las raíces de la planta una mayor superficie para la absorción de agua y nutrientes. Algunas bacterias comensales liberan sustancias que matan a patógenos potenciales. Por desgracia, las biopelículas pueden desbordar los mecanismos de defensa de la planta, provocando enfermedades que atacan a la planta desde el subsuelo o incluso desde el interior de su sistema vascular. Las películas de *Xylella fastidiosa* (*a la derecha se muestra un fragmento de 25 micras de anchura*) suponen un problema para el cultivo de uva y cítricos, entre otros.

STEPHANIE FREESE (*arriba*); CORTESIA DE LOS AUTORES (*micrografía*)/*American Scientist*

mantienen alejados a hongos y otros colonizadores bacterianos.

Pero también las biopelículas fúngicas resultan beneficiosas para la planta. Ciertos hongos micorrícicos penetran en las células de la raíz de una planta al tiempo que forman un extenso entramado en el terreno; incrementan así la superficie que la planta utiliza para la absorción de agua y nutrientes.

Por otra parte, las bacterias del género *Rhizobium* fijan el nitrógeno atmosférico mediante la transformación del nitrógeno gaseoso (N_2) en amoníaco (NH_3). En este proceso intervienen mecanismos de señalización química entre la planta y la bacteria que conducen a la formación de nódulos radicales, donde los agregados bacterianos llevan a cabo la fijación del nitrógeno. Quizá la relación de mayor complejidad es la que implica una interacción entre las bacterias *Rhizobium*, los hongos micorrícicos y una planta huésped. La bacteria construye una biopelícula sobre la superficie del hongo, que, a su vez, establece conexión con la planta; se origina así un sistema simbiótico tripartito, basado en la formación de una biopelícula por parte de dos microorganismos. (A menos que el suelo sea alcalino, el sistema necesita otro componente: bacterias nitrificantes que oxidan el amonio; no medran en el nódulo, sino en el terreno circundante.)

Por último, consideremos las interacciones patógenas de las biopelículas en el interior del sistema vascular de la planta. Por desgracia, no existen tratamientos para las enfermedades vasculares, que resultan devastadoras para numerosos cultivos de interés económico. En el xilema, que transporta el agua en las plantas, se han descrito varias biopelículas patógenas. Aquí nos ceñiremos a *Xylella fastidiosa*. Se trata del agente de la enfermedad de Pierce en la vid y la clorosis abigarrada del género *Citrus* en las naranjas dulces (enfermedades que han causado un gran impacto en la industria vitivinícola californiana y en la industria de cítricos brasileña, con pérdidas económicas que en el decenio pasado superaron los 14.000 millones de dólares). La enfermedad de Pierce limita el desarrollo de la industria vitivinícola también en Flo-

rida, porque en esa región la bacteria es endémica.

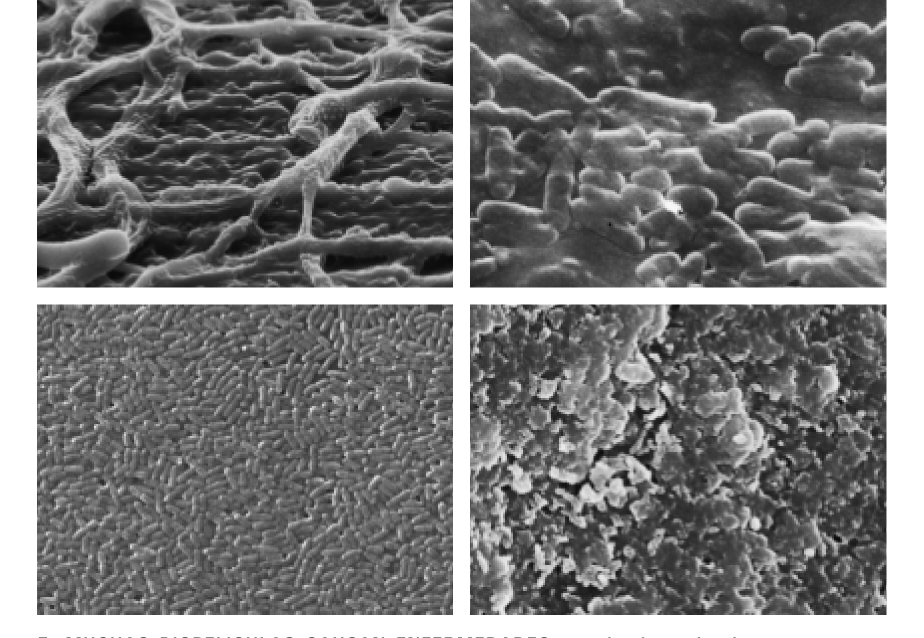
Xylella fastidiosa se transmite por insectos barrenadores que se alimentan del xilema. Adquieren la bacteria al ingerir tejido de una planta infectada. Las bacterias tejen un tapiz rudimentario en el interior del intestino del insecto; desde esa configuración se van desprendiendo en agregados, que infectan otra planta cuando el insecto vuelve a alimentarse. A su vez, el tapiz tapona el xilema y provoca síntomas derivados del estrés hídrico. Por tanto, la película bacteriana desempeña una función fundamental en la colonización de los tejidos vasculares de la planta, en la propagación de la enfermedad y en sus efectos patógenos.

El reconocimiento de la importancia de las biopelículas en las enfermedades de las plantas acaba de empezar. Pasará algún tiempo antes de que la idea se aplique a la microbiología de plantas. Sin embargo, los beneficios serán notables. Un mejor conocimiento de las asociaciones entre plantas y biopelículas puede traducirse en tratamientos más eficaces y respetuosos con el ambiente. Posibilitaría también el desarrollo de aplicaciones comerciales que mejorarían las interacciones beneficiosas entre plantas y microorganismos. De hecho, hoy en día se están utilizando diversos *Rhizobia* como fertilizadores bióticos en explotaciones agrícolas.

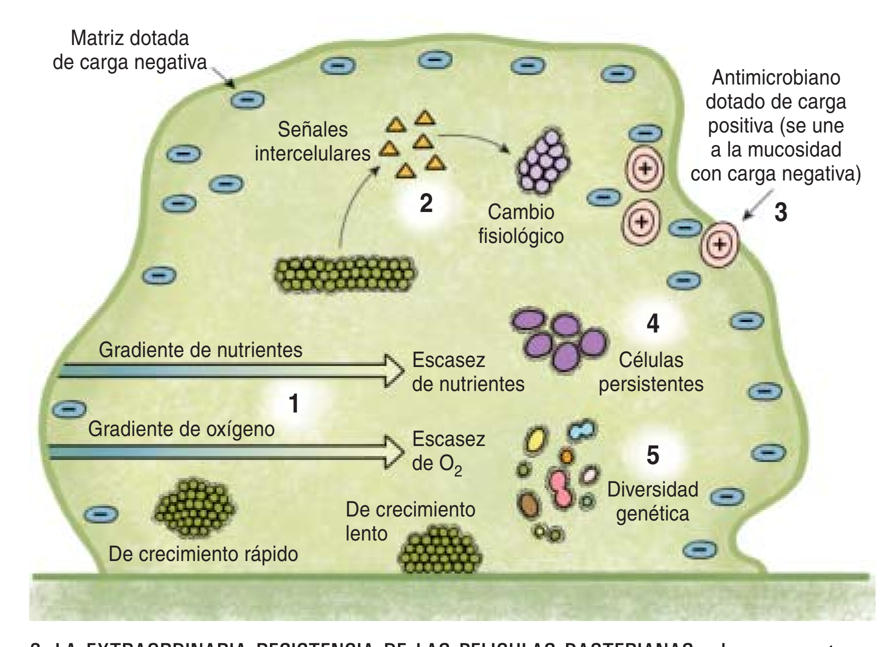
La unión hace la fuerza

El Centro estadounidense para la Prevención y el Control de Enfermedades estima que alrededor del 70 por ciento de las infecciones bacterianas humanas en el mundo occidental están provocadas por biopelículas. Ese elenco incluye la prostatitis y las infecciones renales, así como los trastornos asociados al implante de articulaciones artificiales, catéteres y otros dispositivos médicos, y enfermedades dentales (caries y periodontitis) que se originan a partir de la placa dental, una biopelícula.

En los pulmones de pacientes con fibrosis quística, *Pseudomonas aeruginosa* suele formar películas que provocan neumonías potencialmente letales. La lista de enfermedades relacionadas con las biopelículas es extensa. Y se cree que seguirá creciendo a



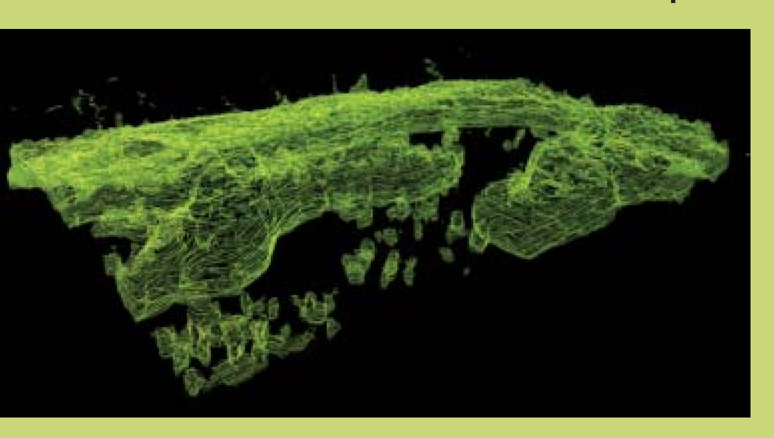
5. MUCHAS BIOPELICULAS CAUSAN ENFERMEDADES y molestias a los humanos. El hongo *Aspergillus fumigatus* (*arriba, izquierda*) provoca infecciones pulmonares potencialmente letales. El patógeno oportunista *Pseudomonas aeruginosa* (*abajo, izquierda*) resulta fatal para los pacientes con fibrosis quística. Las películas bacterianas que crecen sobre las lentes de contacto (*arriba, derecha*) o en los catéteres (*abajo, derecha*) provocan infecciones graves. La anchura de las áreas mostradas en las micrografías oscila entre 14 (lentes de contacto) y 66 micras (*A. fumigatus*).



6. LA EXTRAORDINARIA RESISTENCIA DE LAS PELICULAS BACTERIANAS a los compuestos antimicrobianos se debe a diversos factores. Las bacterias próximas al centro de una microcolonia crecen despacio porque están expuestas a concentraciones menores de oxígeno y nutrientes (*1*); sobreviven, por tanto, a los efectos de los antibióticos, que resultan más eficaces contra las células de crecimiento rápido. Las señales intercelulares (*2*) alteran la fisiología de la biopelícula: hacen que sus miembros produzcan "bombas moleculares" que expulsan los antibióticos de las células; permiten, así, el crecimiento de la comunidad, incluso en presencia de un fármaco. La matriz de la biopelícula está dotada de carga negativa (*3*), de modo que se une a los antimicrobianos dotados de carga positiva; ello evita que éstos lleguen hasta las células del interior de la colonia. Poblaciones especializadas de células persistentes (*4*) no crecen en presencia de un antibiótico, pero tampoco se mueren; cuando el fármaco se elimina, éstas originan una colonia bacteriana normal. Este mecanismo causaría las infecciones recurrentes en hospitales. La diversidad de poblaciones (*5*), genética así como fisiológica, opera a modo de mecanismo de defensa: aumenta la posibilidad de que algunas células sobrevivan ante cualquier desafío.

CORTESIA DE LOS AUTORES, MERLE OLSON Y LIZ MIDDLEMISS, UNIVERSIDAD DE CALGARY (*micrografías*); STEPHANIE FREESE (*abajo*)/*American Scientist*

Nueva concepción de la vida microbiana



La compilación de “secciones” obtenidas mediante un microscopio de barrido con láser confocal proporciona imágenes detalladas de la estructura de una película microbiana. Aquí se muestra un tapiz de *Escherichia coli* cultivado en el laboratorio; para tornarlo visible, se ha introducido en su ADN un gen que codifica una proteína fluorescente.

ANDREW EDMUNDSON, IMAGEN CORTESIA DE EDM STUDIOS/*American Scientist*

El cultivo tradicional de bacterias se basa en la inoculación de un frasco que contiene un medio de cultivo con nutrientes. Si éste se agita de forma constante, las células disponen de oxígeno y el alimento se distribuye de forma homogénea. En estas condiciones óptimas de crecimiento, se obtiene un hermoso lote de bacterias planctónicas flotando en la disolución.

La naturaleza raramente proporciona un entorno tan uniforme. Las bacterias de una biopelícula crecen en una matriz de microentornos heterogéneos que difieren en su contenido de oxígeno, distribución de nutrientes y un sinfín de otras variables químicas. Las bacterias que se adhieren a las paredes de matraces y tubos forman biopelículas maduras. Hasta hace poco se ignoraban por completo o se destruían.

Se han desarrollado varias técnicas de cultivo y análisis de biopelículas. Una se basa en la introducción de un disco rotatorio en un medio de cultivo inoculado. La fuerza de cizalladura provocada por la rotación promueve la formación de una biopelícula sobre el disco. En nuestro grupo de investigación hemos llevado a cabo un ensayo (el MBEC), basado en biopelículas, para el análisis a gran escala de la eficacia de antimicrobianos. El dispositivo en cuestión permite crear 96 biopelículas estadísticamente equivalentes; sirve también para analizar los efectos de una serie de diluciones de compuestos antimicrobianos en una placa de microtitulación estándar. Con tal herramienta buscamos sustancias eficaces contra las biopelículas.

Otro instrumento, una célula de flujo, consta de una cámara y una superficie transparente (un cubreobjetos de vidrio, por ejemplo). A través de la cámara se bombea un medio de cultivo, lo que facilita la formación de una espesa biopelícula sobre la superficie de vidrio. Este método permite examinar comunidades microbianas mediante un microscopio de barrido con láser confocal (MBLC). Con un programa informático se construye luego una imagen tridimensional de la biopelícula a partir de las imágenes captadas por el MBLC.

Puede considerarse que los MBLC complementan los microscopios electrónicos de barrido (MEB). Los MEB, que alcanzan aumentos 10 veces superiores a los MBLC, nos facultan para examinar la forma y la disposición de las células. En cambio los MBLC proporcionan una visión general de la estructura de la biopelícula. El MEB destruye la comunidad microbiana; el MBLC resulta menos invasivo. Se reelaboran secuencias de imágenes en películas que muestran cómo viven y mueren los microorganismos del tapiz constituido.

Por último, los nuevos métodos proteómicos y transcriptómicos permiten examinar la distribución y los patrones de expresión de genes y proteínas en las biopelículas. El desarrollo de estas técnicas ha abierto el camino hacia una nueva visión de la vida microbiana.

medida que ahondemos en la función de estas estructuras microbianas.

En casi todos los casos, la biopelícula desempeña un papel fundamental en la supervivencia y la propagación de los microorganismos en el interior del huésped. Ello se debe a la matriz mucosa, que opera a modo de escudo: ofrece protección a las bacterias patógenas contra anticuerpos y leucocitos, los centinelas del sistema inmunitario. Las biopelículas destacan también por su resistencia a concentraciones extraordinariamente elevadas de antibióticos, que, incluso a dosis menores, resultan letales para sus homólogos planctónicos. De hecho, una biopelícula se halla entre 10 y 1000 veces menos expuesta al ataque de una sustancia antimicrobiana que el mismo organismo en suspensión.

El estudio de este fenómeno, junto con sus serias implicaciones en la lucha contra los patógenos, ha centrado la investigación de nuestro grupo. Hemos desarrollado una técnica para determinar la sensibilidad de una biopelícula ante sustancias antimicrobianas. (Nuestro “dispositivo de Biopelículas de Calgary”, o “ensayo MBEC”, cuya licencia hemos cedido a una compañía canadiense.) Hoy en día, un laboratorio farmacéutico que esté ensayando un fármaco para combatir la neumonía o las infecciones asociadas a los catéteres puede determinar si una medicina eficaz contra patógenos en suspensión erradicaría esos mismos microorganismos en una biopelícula.

En el curso del desarrollo de esta técnica hemos descubierto aspectos extraordinarios de las biopelículas. Hemos avanzado en el estudio de algunas “co-biopelículas” patógenas formadas por especies distintas que medran juntas; también hemos explorado mecanismos de interés potencial en la síntesis de fármacos. En este sentido, la resistencia de las biopelículas a concentraciones elevadas de metales puede aprovecharse para la remoción de metales contaminantes. Además, un conocimiento detallado del mecanismo que utilizan las películas para eludir la toxicidad de los metales puede abrir la puerta a tratamientos antimicrobianos dirigidos contra las biopelículas.

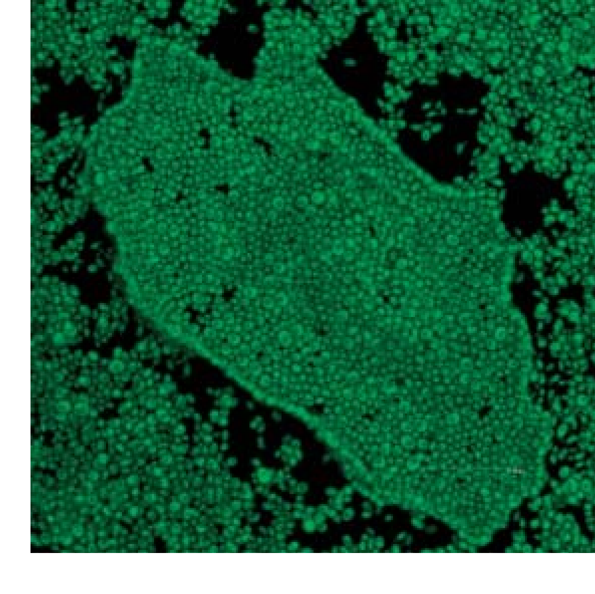
La excepcional resistencia de las bacterias surge, en parte, de la heterogeneidad que existe en el interior de la biopelícula. Los microorganismos más próximos al fluido circundante tienen mayor acceso a los nutrientes y al oxígeno, en comparación con los que se encuentran en el centro de la matriz o cerca del sustrato. En consecuencia, las bacterias de las capas externas crecen con celeridad mayor que las del interior. Este fenómeno opera a la manera de un mecanismo de defensa, pues muchos antibióticos muestran eficacia sólo contra las células de crecimiento rápido; y así, las que crecen lentamente en el interior de la biopelícula tienen mayor probabilidad de sobrevivir. Además, las células centrales se hallan todavía más resguardadas del entorno, porque la matriz de la biopelícula está dotada de carga negativa, por cuya razón se

restringe la entrada de iones metálicos, determinados antibióticos y otras sustancias dotadas de carga positiva.

Uno de los mecanismos de defensa más fascinantes que derivan de la formación de un biopelícula implica un tipo de comunicación intercelular: la *percepción del quórum* ("quorum sensing"). Algunas bacterias liberan una molécula señalizadora, o inductor. Con una densidad celular creciente aumenta también la concentración de estas sustancias. Los inductores interaccionan con receptores específicos en cada célula para activar los genes de la "percepción del quórum" e iniciar una cascada de sucesos que desencadenan la expresión o represión de varios genes del cromosoma bacteriano. Algunas cepas bacterianas parecen recurrir más que otras a la percepción de quórum, pero entre un uno y un diez por ciento de los genes de un microorganismo pueden estar regulados directamente por el proceso descrito.

La percepción del quórum afecta a la síntesis de enzimas implicadas en la reparación y defensa celulares. Así, en *P. aeruginosa* las enzimas superoxidodismutasa y catalasa están reguladas mediante percepción del quórum. En el pulmón de los pacientes con fibrosis quística, esta bacteria forma cúmulos mucosos de células bacterianas que se encuentran mezcladas con los detritus celulares procedentes de la capa epitelial de las vías respiratorias. La primera enzima promueve la destrucción del radical superóxido nocivo (O_2^-); compete a la segunda convertir el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), igual de tóxico, en agua y oxígeno molecular. Estas enzimas ayudan a la biopelícula a sobrevivir no sólo al ataque de los desinfectantes, sino también al de las células del sistema inmunitario del huésped, que matan a las bacterias mediante la liberación de agentes antimicrobianos, entre los que se incluyen las especies reactivas de oxígeno.

La percepción del quórum podría intervenir, además, en la defensa contra fármacos antibióticos. En este caso, el mecanismo incrementa la producción de moléculas que, a modo de sistemas de bombeo, expulsan compuestos de la célula. Estas *bombas multifármaco* reducen la acumulación de antibióticos en el interior de la bacteria; permiten que el microorganismo crezca, incluso en presencia de los fármacos.



7. *CANDIDA TROPICALIS*, UNA LEVADURA que provoca vaginitis, afta e infecciones cardíacas, forma películas harto resistentes a los tratamientos antifúngicos y antimicrobianos. La imagen se ha obtenido mediante microscopía de barrido con láser confocal, una nueva técnica que proporciona instantáneas de las microcolonias microbianas que constituyen una biopelícula.

CORTESIA DE LOS AUTORES (JOE J. HARRISON)/*American Scientist*

Existe heterogeneidad también en cuanto a los tipos de células que contribuyen a la tolerancia antimicrobiana de la biopelícula. Todas las poblaciones bacterianas contienen "células persistentes", de crecimiento lento y especializadas en la supervivencia. Tales células se hallan programadas genéticamente para sobrevivir al estrés ambiental, incluida la exposición a antibióticos. Aunque las células persistentes no crecen en presencia de un antibiótico, tampoco se mueren. No se trata de células mutantes. Incluso en una población de células genéticamente uniforme, una pequeña fracción acomete un cambio espontáneo hacia la forma persistente.

En 2004, Kim Lewis, de la Universidad Nororiental, demostró que las células persistentes generan una toxina, RelE, que conduce a la célula bacteriana hacia un estado latente. Una vez terminada la terapia antibiótica, las células persistentes originan una nueva población bacteriana, que resulta en una recaída de la infección.

La función defensiva de las células persistentes puede haber surgido en las primeras etapas de la evolución. En nuestra era posgenómica, se ha descubierto que muchos genes parecidos se hallan en multitud de bacterias alejadas en términos evolutivos; ello sugiere que los ancestros primitivos comunes contenían genes similares.

Sin embargo, la reducida velocidad de crecimiento de las células persistentes plantea una paradoja, pues una división celular lenta mina la fortaleza de una población. Según Edo Kussell, de la Universidad Rockefeller, la persistencia de las bacterias habría surgido para protegerse de encuentros ocasionales con antibióticos. De ser así, los investigadores que tratan de vencer la resistencia bacteriana a los antibióticos, lucharían contra un mecanismo defensivo ancestral que puede haber estado depurándose a lo largo miles de millones de años. Si pretendemos controlar las infecciones bacterianas, debemos centrar la investigación en las biopelículas en vez de la forma planctónica, más vulnerable.

Los autores

Joe J. Harrison realiza la tesis doctoral en la Universidad de Calgary, donde **Raymond J. Turner** enseña biología. **Lyriam L. R. Marques** es directora de investigación adjunta en MBEC BioProducts, S. A. **Howard Ceri** da clases de biología en el mismo centro, cuyo grupo de investigación en biopelículas dirige.

Bibliografía complementaria

BIOCORROSION: TOWARDS UNDERSTANDING THE INTERACTIONS BETWEEN BIOFILMS AND METALS. I. W. Beech y J. Sunner en *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 15, págs. 181–186; 2004.

BACTERIAL BIOFILMS: FROM THE NATURAL ENVIRONMENT TO INFECTIOUS DISEASES. L. Hall-Stoodley, J. W. Costerton y P. Stoodley en *Nature Reviews Microbiology*, vol. 2, págs. 95–108; 2004.

BACTERIAL PERSISTENCE: A MODEL OF SURVIVAL IN CHANGING ENVIRONMENTS. E. Kussell, R. Kishnoy, N. Q. Balaban y S. Leibler en *Genetics*, vol. 169, págs. 1807–1814; 2005.

Norbert Treitz

Un golpe transmite el siguiente

Para dar una pequeña sorpresa, viene bien una pelota que, sobre otra mayor, caiga al suelo: al rebotar en éste, la pelota grande entrega casi toda su energía cinética a la pequeña, cuyo salto en el aire resulta espectacular. De ello nos ocupamos ya aquí en junio del año pasado.

¿Qué sucede si se deja caer una torre de tres, cuatro o más pelotas con proporciones entre las masas adecuadamente escogidas? ¿Saltará la pelota más pequeña, la de más arriba, aún mucho más alto? ¿Y cómo calcularlo?

Haciendo honor al viejo aforismo de que “las matemáticas están para no tener que calcular”, empecemos por escoger un sistema de referencia que requiera el menor cálculo posible. En general, se trata del sistema donde está quieto el centro de masas de las dos masas puntuales que interactúan elásticamente entre sí. La razón es un teorema fundamental de la teoría de choques: en ese sistema cada una de las masas tendrá tras el contacto la misma energía cinética que antes. El contacto supone la transferencia de movimiento entre ambas.

En otros sistemas inerciales, no acelerados, sólo la suma de las energías cinéticas es igual antes y después. En eso consiste, por definición, un choque elástico. Que se produzca una transmisión de energía cinética entre las masas que chocan, y cuál de ellas recibe y cuál da, dependerá del sistema de referencia implicado.

En el sistema del centro de masas no se transfiere energía cinética: las masas llevan tras el choque las mismas velocidades que antes (*veáse el recuadro* “Transferencia de movimiento y energía: exposición gráfica”). Las direcciones pueden depender de detalles geométricos, las sutilezas que marcan la diferencia entre los malos y los buenos jugadores de billar. En el caso particular de las esferas, la dirección depende del “parámetro de impacto”; en general, de la forma del objeto.

Que la suma de las energías cinéticas antes y después del choque sea la misma, no se debe al principio de conservación de la energía. Dicha norma declara que la suma de todas las energías permanece constante. No hay ninguna ley de la naturaleza por la que la energía cinética deba mantenerse constante. El mundo empírico nos muestra sin cesar contraejemplos.

Durante un choque, la energía cinética se transformará en una deformación de los cuerpos implicados. Por esa vía puede incluso perderse toda la energía cinética. Cuando una sonda espacial toma impulso de un planeta, en su trayectoria por la cercanía del mismo, la suma de las energías cinéticas crece porque los cuerpos en movimiento reciben prestada energía del campo gravitatorio.

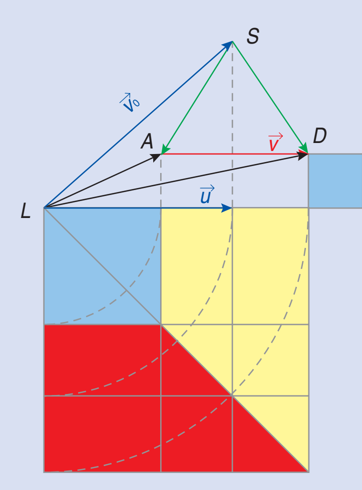
La cuna de Newton

Sobre muchos escritorios —y no sólo de físicos— se encuentra un aparato que llaman “cuna de Newton”: *n* bolas idénticas cuelgan cada una de dos hilos, dispuestas en una fila horizontal, sin solución de continuidad: unas rozan a otras. Si a *m* de ellas se las desplaza hacia afuera —lo más fácil

Transferencia de movimiento y energía: exposición gráfica

La transmisión de energía en las interacciones elásticas entre dos masas puntuales es igual al producto escalar de la transmisión de cantidad de movimiento (o “momento”) y de la velocidad del centro de masas común en el sistema (de “laboratorio”) utilizado. Vale cero, cuando el centro de masas se encuentra en reposo con respecto al sistema del laboratorio.

Se demuestra geométricamente en la gráfica, que presenta la situación en el espacio de las velocidades.



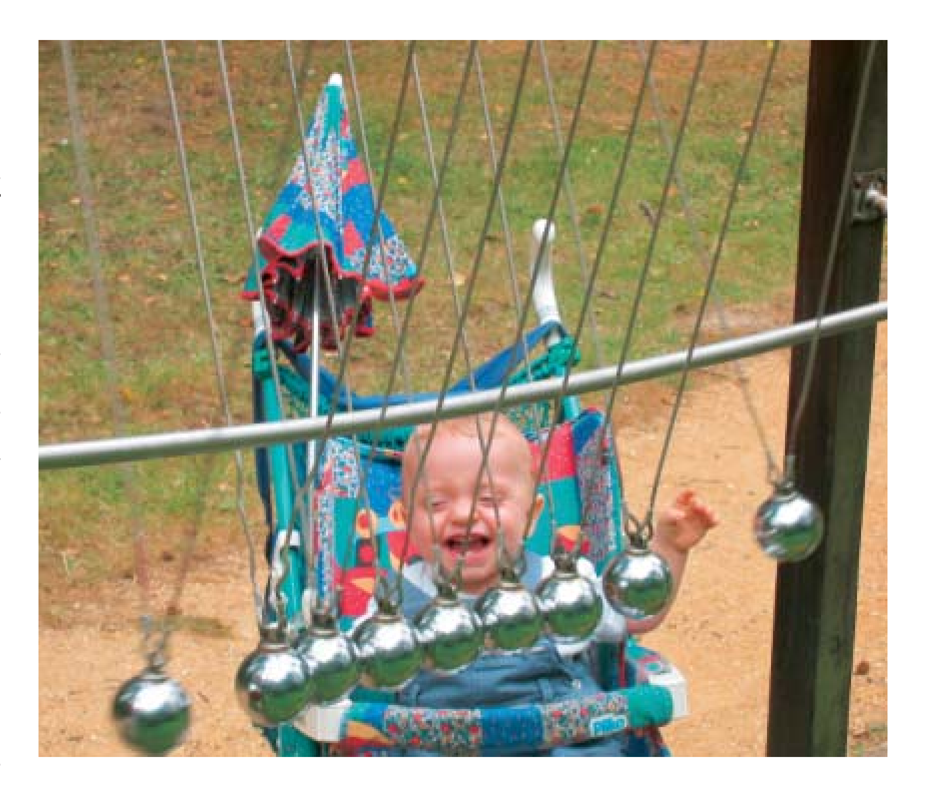
$\vec{p} \cdot \vec{v}_0 = m\,\overrightarrow{AD} \cdot \overrightarrow{LS} = (m/2)\,(\overrightarrow{LD}^2 - \overrightarrow{LA}^2)$

L designa la velocidad del sistema del laboratorio, *S* la del centro de masas común de ambas masas. El vector $\overrightarrow{LS}$ es, pues, la velocidad del centro de masas, medida en el sistema de laboratorio. De modo correspondiente, lo mismo vale para la velocidad de una de las dos masas puntuales antes (*A*) y después (*D*) del contacto. El vector $\overrightarrow{AD} = \vec{v}$ es la diferencia de velocidades, $m\,\overrightarrow{AD}$ la cantidad de movimiento $\vec{p}$ transferida. El producto escalar de $\vec{p}$ con la velocidad $\vec{v}_0 = \overrightarrow{LS}$ es igual al producto de $\vec{p}$ y de la componente $\vec{u}$ de $\overrightarrow{AD}$ en la dirección de $\vec{p}$, que a su vez es, salvo el factor *m*, igual al área del trapecio amarillo o del rojo.

Por otro lado, la energía cinética después del choque es, salvo el factor *m*/2, igual a $\overrightarrow{LD}^2$, es decir, la suma de todas las superficies coloreadas, y “antes” igual a $\overrightarrow{LA}^2$, esto es, la suma de todas las superficies azules (Pitágoras).

Para la otra masa, el dibujo tiene en principio el mismo aspecto, con la salvedad de que las flechas $\overrightarrow{SA}$ y $\overrightarrow{SD}$ apuntan en sentido contrario y son más largas (más cortas) cuando la segunda masa es la de masa menor (mayor). La fórmula vale también para masas diferentes.

1. La cuna de Newton, o sucesión de choques para principiantes.



es tomar la m-ésima— y se las deja caer, siempre saldrán m bolas por el otro extremo —que se alejarán tanto como se separó a las m que se ha dejado caer de nuevo—, aun cuando cabría quizá esperar que en ese extremo una sola bola recibiera todo el impulso.

La explicación corriente no va más allá de la expresión "principio de la conservación de la energía y del momento", lo que como mínimo da lugar a falsas interpretaciones (*véase la figura 2*). Se ha de suponer que todos los choques son, con gran exactitud, elásticos y que el conjunto de la colisión se puede descomponer, al menos en principio, en choques donde sólo participan dos bolas.

Numeremos las bolas de izquierda a derecha, de 1 hasta n. Separemos las primeras m bolas hacia la izquierda y dejémoslas caer. La bola m alcanza primero a la bola $m + 1$ y le transmite inmediatamente todo su impulso y toda su energía cinética (medidos en el sistema de laboratorio); queda, pues, inmóvil. Mientras la bola $m + 2$ todavía sigue quieta, el movimiento y la energía se desplazan a la velocidad del sonido a través de la bola $m + 1$. La figura 2 muestra el desenlace.

La escala de Jacob

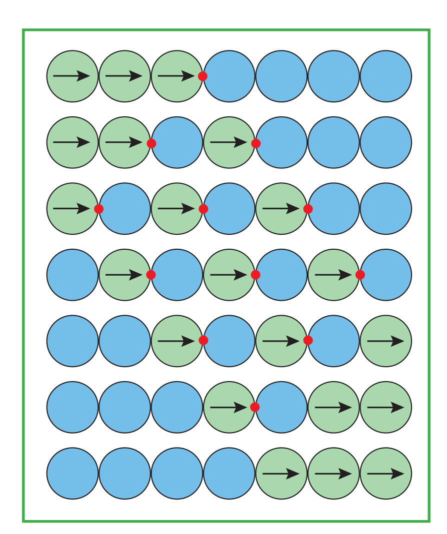
¿Se puede con una torre de muchas pelotas lanzar una masa (la pelota situada en la cúspide) hasta la Luna mediante una serie de choques concatenados? Para responder, reflexionemos primero sobre el aporte de energía necesario.

Con una gran escalera que llegase hasta el cielo —recuérdese el sueño de Jacob, relatado en Génesis, 28— ¿podríamos salir del campo gravitatorio de la Tierra? En principio sí. La fuerza de atracción de la Tierra disminuye a medida que aumenta la distancia. Si la escala celestial está construida de tal manera que el paso de un peldaño al siguiente siempre requiera la misma cantidad de trabajo, los peldaños estarán tanto más alejados cuanto más alto se llegue. Desde el último, bastaría lanzarse para salir volando.

O bien, podríamos imaginar que la fuerza de atracción de la Tierra no disminuye. En tales condiciones, nuestro asaltante del cielo realizaría, en una escalera con distancia constante entre peldaños, el mismo trabajo que en la situación anterior si subiese desde la superficie terrestre hasta una altura igual al radio de la Tierra, 6370 kilómetros (se calcula en el recuadro "Escalera hacia el cielo: la versión corta").

Así no se vencería el campo gravitatorio del Sol. Para un viaje a la Luna, sí bastaría. Quien lograra ascender 6370 veces una montaña de 1000 metros de altura, podría también llegar a la Luna con una escalera adecuada, mientras contase con comida y oxígeno. Quien pudiese salvar 1000 metros de diferencia de altura por día en un campo gravitatorio igual al de la superficie de la Tierra, se liberaría del campo terrestre, teniendo libres los fines de semana y 30 días de vacaciones al año, en casi 28 años.

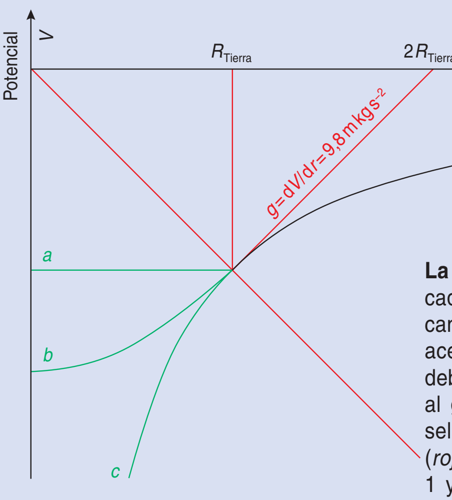
Desgraciadamente, nuestro excursionista no puede llevar consigo en la mochila el alimento necesario. Pesaría mucho más que él mismo, y para cargarlo consigo necesitaría, por si fuese poco, mucha más comida. Aun cuando su propio peso fuese en un 50 por ciento consumible como alimento, habría acabado con esas reservas a poca altura. Que los cohetes con combustible químico lleguen a la Luna se debe a la extraordinaria desproporción entre la masa inicial



2. Cuando en la cuna de Newton se dejan caer tres de las siete bolas sobre las restantes, diferentes pares de bolas entran en contacto en diferentes instantes (*marcas de rojo*). Las bolas dibujadas en azul están en reposo, las verdes tienen un movimiento hacia la derecha (*flechas*). Para simplificar se ha supuesto que tienen lugar simultáneamente varios contactos en diferentes puntos.

ELKE REINECKE (*arriba*); SDW (*abajo*)

Escalera hacia el cielo: la versión corta



En la curva negra el potencial (la energía gravitatoria dividida por la masa) está representado respecto a la distancia al centro de la Tierra. En el espacio exterior, consiste en una parte de hipérbola rectangular, pues la integral de una fuerza proporcional a $1/r^2$ es proporcional a $1/r$.

Tenemos libertad para escoger los ejes de coordenadas. La aprovechamos para que la hipérbola corte la bisectriz del sistema de coordenadas en $r = R_{Tierra}$ (la superficie terrestre) y sea simétrica respecto a esa recta.

La pendiente de la hipérbola en cada punto muestra la intensidad del campo gravitatorio en ese punto (la aceleración de caída, sin correcciones debido a empujes ascensionales y al giro de la Tierra). Para nuestra selección de escalas, la tangente (*roja*) tiene en $r = R_{Tierra}$ la pendiente 1 y corta por ello el eje r en el doble del radio. Quien pueda superar una diferencia de altura de 6370 kilómetros (un radio de la Tierra) desde el suelo en contra del campo gravitatorio de la Tierra, desarrolla suficiente energía como para escapar del campo gravitatorio.

En el centro de la Tierra, la curva de potencial es una de las tres curvas verdes, dependiendo de que la masa de la Tierra esté repartida sobre la superficie de una esfera hueca (*a*), llene homogéneamente toda la esfera (*b*, bastante realista) o se concentre en el centro de la Tierra (*c*).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

y la carga útil, una masa inicial que además va desprendiéndose mientras se alza el vuelo. Veámoslo con más detalle.

Abandonar la Tierra desde el suelo hasta el infinito para una masa m requiere $mgR_{Tierra} = m \cdot 6{,}3 \cdot 10^7$ joule por kilogramo, o $0{,}7 \cdot 10^{-9}$ veces la masa, según la fórmula que Albert Einstein publicó hace cien años. Para escapar de la Tierra bastaría, pues, con transformar en energía cinética apenas una parte en mil millones de la propia masa en movimiento. A falta de antimateria disponible, tal cosa no es posible, sin embargo.

La ganancia de energía por oxidación de un buen combustible, como la grasa (en el ser humano) o los hidrocarburos (en el cohete), proporciona por kilogramo de grasa, redondeando, 35 megajoule. Cuando se tiene en cuenta el oxígeno necesario, aún salen 8 megajoule por kilogramo, $0{,}7 \cdot 10^{-10}$ veces la masa del combustible y del oxígeno. Visto así, el viaje espacial cercano a la Tierra ocurre en el noveno decimal y la química en el décimo. Un viaje espacial con fuentes de energía químicas, por lo tanto, sólo resulta posible si la mayor parte de esas fuentes y de sus residuos no se aleja mucho del suelo.

Subir un kilogramo 6370 kilómetros hacia arriba cuesta; pero los requisitos energéticos no parecen astronómicos. Son los mismos que necesita una locomotora de peso medio (63.700 kilogramos) para vencer una diferencia de alturas de 100 metros. Imaginémonos un polipasto, con cuerdas y ruedas de masa despreciable, donde por un lado caen 63.700 kilogramos a lo largo de cien metros y por el otro una masa de un kilogramo sube, en el campo uniforme que imaginábamos antes, hasta una altura igual al radio de la Tierra. Con el campo gravitatorio real, que disminuye con la altura, debería crearse una multiplicación variable; verbigracia, con poleas en forma de caracol o cónicas, siempre sin masa. En efecto, mientras la locomotora bajase hasta el valle desde el viaducto, el kilogramo subiría hasta la Luna.

¿Con la pirámide de balones hasta la Luna?

Apliquemos, pues, nuestros experimentos con balones a la astronáutica. Si se dejan caer dos pelotas, con una proporción de masas 3:1, la ligera montada sobre la pesada, se transmitirá toda la energía cinética hacia la pequeña; alcanzará el cuádruple de su altura inicial. La pesada apenas si se levantará del suelo, sin más botes. Lo demostramos ya en el número de *Investigación y Ciencia* mencionado.

Una proporción de masas superior a 3:1 no sirve de nada. Hasta con una proporción infinita entre las masas de las pelotas, sólo se obtendría nueve veces la altura, y esto además en el caso ideal, que no se alcanza nunca debido a la imperfección de la elasticidad (la proporción finita entre masas cuenta entonces mucho menos). Que con una desproporción infinita de masas la pelota pesada rebotase otra vez hasta su altura inicial, como si no estuviera la ligera, sirve de parco consuelo a quien esperaba de esta un viaje muy largo.

Buscamos, pues, una situación en la que, al dejar caer una gran masa desde una altura moderada, la mayor parte de ella quede, una vez toque el suelo, inmediatamente parada, mientras una parte bastante menor sube muy arriba. En un campo gravitatorio homogéneo el balance de energías correspondiente es muy fácil: las alturas mantienen la misma proporción que haya entre la masa total que cae y la parcial que salta hacia arriba. Pero ¿cómo se consigue que la masa reparta adecuadamente su energía? Veremos que hay que repartir con habilidad la masa entre muchas pelotas apiladas unas sobre otras verticalmente. Sólo la de más arriba saldrá disparada hacia los cielos, mientras que las demás se quedarán quietas en el suelo, al mismo tiempo y sin que influya la fricción. ¿Se supera así la altura inicial multiplicada por nueve? ¿Se puede llegar ilimitadamente arriba?

Imaginémonos ahora una torre de balones, de masa decreciente de abajo arriba oportunamente elegidas, que se toquen dos a dos. Todas caerán simultáneamente desde una altura, que les aportará una velocidad común; justo antes de que empiece la cascada de choques. Primero, la inferior se refleja elásticamente en el suelo y vuelve hacia arriba con una velocidad $+v$. Las masas tienen que ser tales, que cada pelota que sube quede de golpe en reposo en el sistema de laboratorio por el efecto de la que tenga encima. Las que vienen de arriba caen con velocidad $-v$, las que suben son más rápidas: van a $+nv$, con un todavía desconocido factor n que variará de pelota a pelota.

Consideremos la pelota número i y su vecina de arriba, $i + 1$. Las masas son m_i y m_{i+1}, las velocidades en el sistema de laboratorio $+nv$ y $-v$. Su centro de masas común tiene la velocidad $v_{CM} = (m_i nv - m_{i+1}v)/(m_i + m_{i+1})$. La pelota i lleva en este sistema del centro de masas una velocidad $nv - v_{CM}$ antes del choque y la misma pero con signo opuesto después. En el sistema del laboratorio se moverá entonces a $2v_{CM} - nv$. Escogeremos, pues, las proporciones entre las masas de modo que esta velocidad devenga cero: encontraremos $m_{i+1}/m_i = n/(n + 2)$ como determinación recursiva de todas las proporciones de masas entre pelotas vecinas.

La pelota inmediatamente superior viene con $-v$ en el sistema del laboratorio, $-v - v_{CM}$ en el sistema del centro de masas, y sube tras el choque a una velocidad $v + v_{CM}$ en el sistema del centro de masas, $v + 2v_{CM}$ en el del laboratorio. El resultado, pues, es que cada pelota sube con un v más de lo que su vecina inferior ha hecho en el choque anterior. Si le asignamos el número 1 a la pelota inicial, la que toca el planeta directamente, la pelota i-ésima tendrá una velocidad i veces la de la primera, $nv = iv$, antes de colisionar con su vecina de arriba (mientras tenga una).

3. De la pirámide de 252 pelotas que caen de una altura de 100 metros, todas quedan quietas al llegar al suelo menos la que está más arriba, que sale disparada hasta la Luna. Cada diez pelotas una es negra. El dibujo está hecho a escala.

Para que las energías cuadren, la multiplicación por 63.700 de nuestros 100 metros requerirá que se multiplique por 252 veces la velocidad inicial. Por lo tanto, el número de balones ha de ser $n_{máx} = 252$, y el más pequeño, el de arriba del todo, ha de tener un 1/63.700 de la masa total.

¿Cuánto puede pesar la de abajo? Para ello fijémonos en la determinación recursiva de la masa. Si normalizamos la masa de la pelota inferior a 1, tendremos para las masas de las pelotas la sucesión

$$1, \frac{1}{3}, \frac{1}{6}, \frac{1}{10}, \frac{1}{15}, \frac{1}{21}, \frac{1}{28}, \frac{1}{36}, \ldots$$

Para sumarla la escribimos de forma algo diferente:

$$\frac{2}{1\times 2} + \frac{2}{2\times 3} + \frac{2}{3\times 4} + \frac{2}{4\times 5} + \ldots$$

Como

$$\frac{1}{n\times(n+1)} = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}$$

valdrá

$$\frac{1}{1\times 2} + \frac{1}{2\times 3} + \frac{1}{3\times 4} + \ldots + \frac{1}{n\times(n+1)}$$

$$= \left(1 - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4}\right) + \ldots + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}\right)$$

$$= 1 - \frac{1}{n+1}.$$

Esta determinación sencilla de la suma de esa serie de aspecto no tan trivial fue ideada por el joven diplomático Leibniz cuando su anfitrión Christiaan Huygens le dio ese hueso que roer.

Para nuestro salto a la Luna, significa que, si la pelota inferior cae cien metros, tendrá que comprender algo más de la mitad de la masa y unas 30.000 veces la carga útil.

El lector puede ahora calcular fácilmente que, con una caída desde esa misma altura, se necesitarían unas 1000 pelotas para abandonar no sólo el campo gravitatorio de la Tierra, sino también el sistema solar.

Infinito elevado a *n*

Para una proporción infinita de masas de ambas pelotas y si todos los choques son perfectamente elásticos, ya la segunda pelota alcanza el triple de la velocidad, y con ello nueve veces la altura inicial. ¿A qué altura se llega si iteramos este proceso y se deja caer una pirámide de n pelotas cuyas masas difieran, para cada par de ellas, en un factor "infinito"? De la ligera pelota y la pesada raqueta o del impulso de satélites por aproximación a planetas, sabemos que, en el sistema de laboratorio, la magnitud de la velocidad de una masa muy ligera que choque con una pesada puede aumentar hasta el doble que la de ésta. Ahora caen todas las pelotas con velocidad $-v$ sobre sus correspondientes vecinos inferiores, pero estos vienen en sentido contrario, hacia arriba, más deprisa (excepto la primera pelota) que en el caso anterior. La segunda pelota tiene ya $+3v$, como hemos podido ver. La tercera pelota recibe por ello $(1 + 2\cdot 3)v = 7v$, la cuarta $15v$; la sucesión continúa como $(2^n - 1)v$. Para llegar a la Luna con una altura inicial de 100 metros, bastarían, según esta estimación fantástica, ocho pelotas, pues 255 es mayor que 252, pero con una proporción de carga útil bien modesta: la potencia –9 de la proporción entre masas, en este caso infinita por definición. No hemos de sorprendernos, pues en esta variante las otras siete pelotas no se quedan inmediatamente en el suelo, sino que brincan hasta unas 49 veces, 224 veces, etc., la altura inicial, un derroche.

Para impedir, si se quiere una realización práctica de la idea, que la pirámide de las pelotas se desmonte, se las perfora y atraviesa con un vástago que se engancha a la pelota mayor. Por desgracia, causará una fricción apreciable. Por ello, el resultado suele ser menos impresionante que en el sencillo experimento manual de dos balones y un planeta.

Juan M.R. Parrondo

El número *h*

Desde hace unos meses la comunidad científica está sobresaltada. En los congresos, convenciones o simples charlas de café entre investigadores y profesores de universidad, no se habla de otra cosa: el número *h*. ¿Es una nueva constante fundamental de la Naturaleza?, ¿la masa total del universo?, ¿alguna cantidad crucial en el origen de la vida? No. Se trata de algo bastante más mundano, pero capaz de despertar tantas pasiones entre los investigadores como cualquiera de los grandes enigmas de la ciencia.

El número *h* es un modo simple de evaluar la calidad de un científico. La idea original es de Jorge Hirsch, un físico argentino, profesor de la Universidad de California. Se publicó en septiembre del año pasado en los *Proceedings of the National Academy of Science*. Desde entonces, no hay científico que no haya calculado secretamente su número *h* y el de sus más queridos y odiados compañeros.

Siempre es útil disponer de una herramienta objetiva para evaluar la calidad de alguna actividad. Pero en el caso de la ciencia, una herramienta de este tipo se ha hecho indispensable por varias razones. En primer lugar, porque la mayor parte de los recursos destinados a la investigación básica son públicos y se necesitan criterios objetivos para distribuirlos. Administradores y evaluadores académicos tienen constantemente que repartir fondos, conceder becas y contratos o aprobar proyectos. En una empresa, la productividad de un departamento, incluido el de investigación y desarrollo, puede evaluarse con relativa facilidad en términos económicos. Sin embargo, lo que la investigación básica aporta a la sociedad no es siempre cuantificable económicamente o lo es a muy largo plazo.

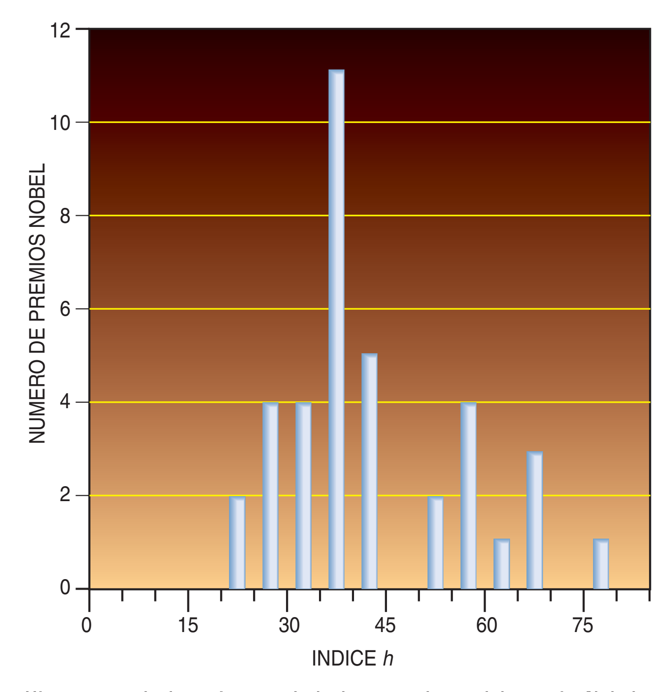
En segundo lugar, la creciente especialización hace cada vez más difícil este tipo de evaluaciones. En muchas ocasiones, la relevancia de un trabajo sólo puede ser juzgada con verdadera competencia por los contados expertos que investigan en ese mismo tema y que probablemente tendrán intereses compartidos o en conflicto con el autor de dicho trabajo, cuando no simples vínculos de amistad o enemistad.

Muchos consideran que estas razones reflejan la crisis de la ciencia contemporánea. ¿Cómo es posible que no sepamos decidir si una contribución científica es relevante o no? ¿Cómo es posible que sólo un grupo muy reducido de colegas sea capaz de semejante decisión? ¿Algo que *sólo* es relevante para unos pocos científicos que trabajan en el mismo tema no es, por definición, irrelevante para la ciencia y la sociedad? No hay respuesta sencilla.

La ciencia se ha convertido en una macroindustria en la que muchas pequeñas unidades trabajan a destajo en problemas insignificantes. Pero el conocimiento que se genera en estas modestas "unidades de producción" se transmite en ocasiones hacia grupos de científicos que se dedican a problemas cruciales o con más aplicaciones; por ejemplo, el origen del universo y el diagnóstico del cáncer, respectivamente. Es difícil prever cuáles de los miles de pequeños avances científicos repercutirán de un modo determinante en el futuro.

Una de las herramientas básicas para evaluar el impacto de un trabajo científico es el "número de citas", es decir, el número de artículos posteriores que lo mencionan. Cuando en un artículo citamos un trabajo anterior, significa que lo hemos utilizado, porque, por ejemplo, en él se desarrollaba una técnica que hemos empleado en el nuestro o se planteaba un problema que ahora resolvemos. Así pues, las citas miden el impacto científico de un trabajo, sin que ello suponga, por necesidad, una calidad indiscutible. En ocasiones, un artículo reiteradamente citado ha resultado ser erróneo; cabe también que se le traiga a colación frecuente porque haya dejado abiertas cuestiones fáciles de resolver. En cambio, puede muy bien acontecer que un artículo que cierre definitivamente un problema, aunque se trate de un problema de capital importancia, se cite menos que un artículo de calidad inferior.

A pesar de todo, el número de citas sigue siendo el parámetro común para medir la calidad de un trabajo. En 1960, Eugene Garfield, experto en bibliometría, creó el *Science Citation Index* (SCI), un índice o registro de



Histograma de los números *h* de los ganadores del premio Nobel de Física en los últimos 20 años.

las citas de los artículos científicos publicados en las principales revistas internacionales. El índice continúa siendo una herramienta fundamental en la investigación. Imagine el lector que ha encontrado un artículo de 1980 con unos resultados interesantes sobre los que quiere profundizar. El SCI le permite saber todos los artículos posteriores a 1980 que han citado ese trabajo. Con ello puede ponerse completamente al día sobre el asunto en cuestión.

Pero el interés del SCI de Garfield ha aumentado, asimismo, por su utilidad para evaluar la trayectoria completa de un investigador. ¿Cómo? Se han propuesto diversos indicadores, como el número total de citas o el número de citas por artículo. En su artículo, Hirsch aborda las limitaciones de estos indicadores y propone el suyo. Para el argentino, el número *h* de un científico es el máximo número del que puede decir: "Tengo *h* artículos citados al menos *h* veces". Aunque su definición parezca extraña, es muy fácil encontrar el número *h* utilizando el SCI. Basta buscar todos los artículos de un autor y ordenarlos por número de citas. En la lista resultante, el artículo en donde el número de orden y el número de citas se cruzan nos proporciona el número *h* del autor. El procedimiento es tan sencillo, que en 10 minutos uno puede buscar el número *h* de todo su departamento (siempre que el nombre sea fácilmente reconocible: es bastante difícil encontrar el *h* de un Rodríguez o un Sánchez). Esta sencillez de "cálculo" es una de las razones del éxito de la idea de Hirsch.

Pero, ¿es el número *h* un buen indicador de la calidad de un científico? Hirsch ha calculado el número *h* de muchos físicos. Al parecer, en la cúspide se encuentra Edward Witten, físico matemático actualmente en Princeton, con un *h* = 110, es decir, tiene 110 artículos con al menos 110 citas. Más de 100 artículos de investigación constituyen una trayectoria científica bastante sólida. Un artículo con más de 100 citas se puede considerar un éxito profesional. ¡Las dos cosas a la vez, 110 artículos con más de 110 citas, es algo realmente impresionante! Sin embargo, Witten no ha conseguido el premio Nobel, al menos todavía, aunque sí la medalla Fields, máximo galardón en el ámbito de la matemática.

De los siete físicos con mayor *h* hay cuatro premios Nobel: Anderson (*h* = 91), de Gennes (*h* = 79), Wilczek (*h* = 68) y Gross (*h* =66). Completan el trío restante el mencionado Witten y dos físicos de materia condensada, Cohen (*h* = 94) y el español Manuel Cardona (*h* = 86), director del Instituto Max Planck del Estado Sólido en Stuttgart. En la figura podemos ver también un histograma de los números *h* de los premios Nobel de Física de los últimos 20 años, tomada del artículo de Hirsch. El índice *h* presenta una considerable dispersión, variando desde 22 hasta 79, pero está bastante concentrado en torno a 40.

Un físico con un número *h* en torno a 40 tiene, sin duda, una trayectoria influyente, en el sentido de que sus trabajos han dictado líneas de investigación seguidas por muchos otros.

Los *h* bajos son otra cuestión. Puede haber científicos con resultados muy relevantes y, sin embargo, con una trayectoria irregular. Recordemos a Mitchel Feigenbaum, quien encontró la primera ruta al caos conocida, aplicando además en el campo de los sistemas dinámicos una técnica desarrollada en la física estadística. Su contribución es muy relevante no sólo para la física, sino para todas las ciencias. Sin embargo, tiene un modesto *h* = 16, a pesar de que su principal trabajo sobre caos supera las 1700 citas.

En mi opinión, el índice *h* no es concluyente cuando se trata de evaluar o comparar trayectorias individuales, pero sí puede ser útil para análisis más generales. Por ejemplo, Hirsch deduce de sus propias observaciones que el *h* típico para conseguir una plaza de profesor permanente en una buena universidad de los Estados Unidos es 11, y 18 para una cátedra (siempre en el campo de la física). En las últimas pruebas para acceder al cuerpo de catedráticos en nuestro país, son esos los números que se han barajado. De hecho, en una de las disciplinas de mayor desarrollo, la física de la materia condensada, un candidato que no consiguió la plaza tenía un *h* = 21 (los que sí la consiguieron tenían números *h* parecidos). Al mismo tiempo, en nuestras universidades hay muchos catedráticos de física que no llegan a un *h* = 5. Esto no hace más que indicar el enorme progreso de la investigación científica española en las últimas décadas y la necesidad urgente de renovar el personal investigador o al menos de dar cabida a toda una generación de científicos de muy alto nivel que necesitan contratos y medios para desarrollar su trabajo.

El número *h* se puede calcular también para instituciones: será el máximo número del que se puede decir "hay *h* artículos de nuestra institución con al menos *h* citas". El número *h* de distintas universidades españolas y norteamericanas se muestra en esta tabla:

Universidad	***h***
MIT	470
Stanford	419
Berkeley	328
Harvard	307
Alabama	287
Maine	106
Autónoma de Madrid	152
Barcelona	141
Autónoma de Barcelona	98
Complutense de Madrid	96

De la tabla se desprende que *h* es un buen indicador del nivel de investigación de cada universidad. Algunas universidades españolas de primer rango podrían compararse a una universidad de nivel medio-bajo estadounidense, como la de Maine, a pesar de que nuestros científicos están, en media, a un nivel similar al de los científicos norteamericanos. Estos datos no hacen más que plasmar la necesidad de que los científicos jóvenes puedan desarrollar plenamente su carrera profesional en España.

Mark Fischetti

VIDRIO INTELIGENTE

Discreto y fresco

Nos servimos de tabiques de vidrio para separarnos de otras personas y aislarnos de la intemperie, aunque sin impedir el paso de la luz. Pero esto último puede ser un inconveniente si deseamos intimidad o bloquear el calor solar. Tal inconveniente puede salvarse con los vidrios inteligentes, que nos permiten variar a nuestro gusto las propiedades de las ventanas.

Pulsando un botón, el vidrio de cristal líquido puede pasar en un instante de transparente a velado, convirtiendo un tabique transparente de una sala de reuniones, una cabina de ducha o la ventanilla trasera de una ambulancia en una barrera visual. Se eliminan así elementos como persianas, pantallas o cortinas que además de ocupar espacio, son focos de suciedad. Es imposible ver a través de ese “vidrio de intimidad” porque dispersa los rayos incidentes, aunque la difusión inunda el interior de luz natural.

Los vidrios electrocrómicos se oscurecen cuando se aplica una tensión eléctrica durante un tiempo que va de varios segundos a varios minutos. Empleados en las ventanas de los edificios, ensombrecen los interiores y reducen el gasto en refrigeración. El grado de tintado fijado por el usuario persiste tras apagar la alimentación eléctrica.

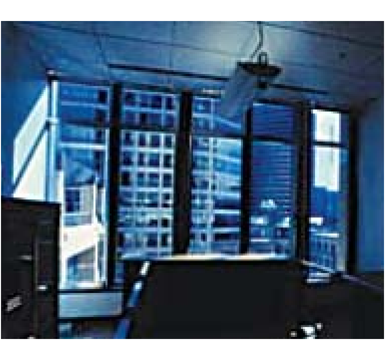
Otra opción la ofrecen los vidrios que contienen partículas suspendidas, que en cierto modo funcionan como los de cristal líquido. Las ventanas con geles termocrómicos, que se tornan blancos o se colorean cuando el calor solar sobrepasa una temperatura umbral, también reducen las necesidades de refrigeración interna.

Los vidrios de intimidad no se emplean más por culpa de su precio, que oscila entre 1300 y 1700 euros el metro cuadrado, frente a los 130 euros el metro cuadrado del vidrio templado corriente. Pero los usuarios se interesan más cada día: “Se están utilizando no sólo para salas de reunión y mamparas de cuartos de aseo, sino en claraboyas para bloquear los rayos ultravioleta (UV), para dotar de privacidad a los reservados de los restaurantes, en agencias bancarias e incluso en ventanillas de avión”, apunta Jeff Besse, presidente de LTI Smart Glass, en Lenox (Massachusetts).

El precio de los vidrios electrocrómicos para edificios de gran rendimiento energético puede que doble al del vidrio aislado con gas de “baja emisividad”, pero la cuestión más importante es convencer a arquitectos y constructores acerca de la durabilidad a largo plazo. Según declara Roland Pitts, jefe del equipo de optoelectrónica del Laboratorio Nacional de Energía Renovable, en Golden (Colorado), “las ventanas deben ser estables durante 30 o 40 años bajo condiciones ampliamente variables de temperatura y radiación solar” mientras sufren decenas de miles, o más, de apagados y encendidos.

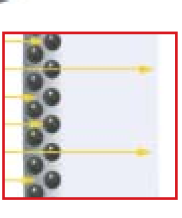
Revestimiento conductor
Vidrio transparente
Oxido de tungsteno (tintado)
Sin voltaje

1. UNA VENTANA ELECTROCROMICA, cuando está desactivada, deja pasar la luz; todas las capas son transparentes.



Bronce al tungsteno (tintado)
Conductor iónico
Acumulador iónico

2. LA APLICACION DE UNA TENSION ELECTRICA crea un campo eléctrico que pone en movimiento los iones de litio del acumulador; el óxido de tungsteno se transforma en bronce de tungsteno. Esa capa absorbe los rayos ultravioleta y ciertas longitudes de onda visibles, lo que produce el tintado. Este es tanto más oscuro cuanto más dura la aplicación del voltaje. El tintado persiste durante mucho tiempo tras la supresión del voltaje; al aplicar un voltaje de signo contrario el vidrio se torna transparente. En otros modelos de estado sólido, las capas activas internas constituyen una película fina aplicada a una hoja de vidrio.



3. LAS LENTES FOTOCROMICAS están dopadas con haluros de plata. Las moléculas se excitan cuando son alcanzadas por los rayos ultravioleta solares; absorben entonces longitudes de onda del visible, eliminando el deslumbramiento y oscureciendo el vidrio. En los interiores, en ausencia de rayos UV, las lentes se aclaran.

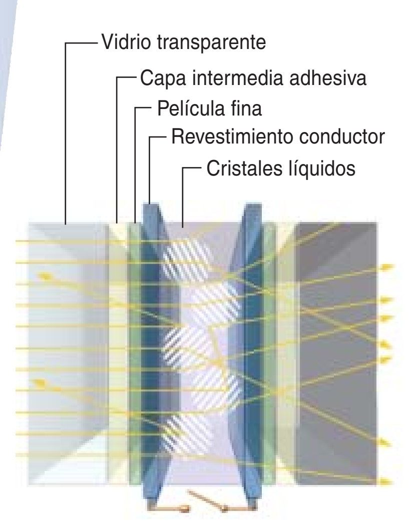
LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE BERKELEY (*arriba y centro izquierda*); SMARTGLASS IRELAND LTD. (*arriba y centro derecha*); ILUSTRACION DE GEORGE RETSECK

➤ COMPETENCIA AUTOMOVILISTICA: En los retrovisores de algunos automóviles se emplean vidrios electrocrómicos para atenuar el resplandor del reflejo de los faros. Empleando vidrios de esa clase en las ventanillas laterales o traseras, los conductores pueden ajustar el tintado cuando deseen más intimidad, pero esas superficies más extensas pueden tardar seis minutos, o más, en oscurecerse. Los fabricantes de vidrios de cristal líquido y de partículas suspendidas, que cambian de tinte en menos de medio segundo, tienen ese mercado en su punto de mira. El intenso tintado de las ventanillas de algunos automóviles actuales es permanente.

➤ DIAS DESPEJADOS: Los paneles de doble hoja de vidrio de la mayoría de las ventanas de las salas de estar transmiten sólo el 70 por ciento de la luz solar (incluso en los días claros). La mayoría de los vidrios inteligentes llegan también a esa cifra. Los parabrisas, hechos con una capa de polímero entre dos hojas transparentes, dejan pasar un poco menos del 70 por ciento.

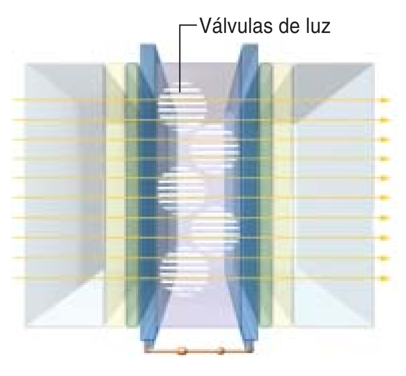
➤ ESPEJOS SEMITRANSPARENTES: Un espejo semitransparente, o monodireccional, es una hoja simple de vidrio una de cuyas caras tiene un revestimiento que refleja sólo la mitad de la luz que incide en ella. En las comisarías de policía, la cara reflectora se enfrenta hacia una "sala de interrogatorios", cuya fuerte iluminación se refleja intensamente sobre el revestimiento, impidiendo que los sospechosos vean la sala oscurecida que hay al otro lado del vidrio. Desde la oscuridad, los testigos pueden ver a través del cristal aunque sólo lo atraviesen la mitad de los rayos. Si se enciende la luz de la sala de testigos, aumenta la transmisión hacia los sospechosos, y éstos pueden ver a sus acusadores, si bien deficientemente.







4. UNA VENTANA DE CRISTAL LIQUIDO, cuando está desactivada, aparece velada. Los cristales, embebidos en una película transparente, están orientados al azar y dispersan los rayos de luz en todas las direcciones, imposibilitando al ojo enfocar una imagen desde el exterior. Pero la luz pasa rebotando al interior, por lo que éste permanece iluminado.





5. LA APLICACION DE UNA TENSION ELECTRICA crea un campo eléctrico que alinea los cristales. Las "válvulas de luz", o ranuras, impresas en los cristales dejan pasar la luz visible en paralelo, con lo que el vidrio se presenta transparente, pero brumoso. La capa intermedia adhiere la película al vidrio y bloquea los rayos UV. Un tabique como el representado aquí consume menos que una bombilla de 100 watt.

Hervé This

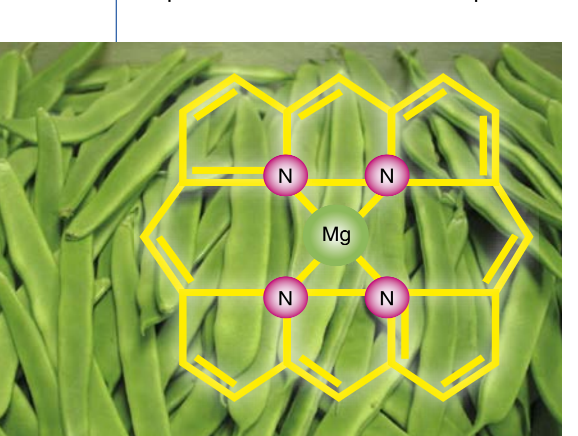
El color verde de las judías

El verdor de las judías verdes las hace apetitosas. ¿Qué se puede hacer para conservarlo? Sobre este tema abundan los trucos no probados científicamente. Así, en 1896, el cocinero parisiense Paul Friand escribe: "Para conservar el tono verde de las judías, sobre todo hay que evitar tapar la cacerola. La adición de una puntita de bicarbonato a las judías conserva su verdor". En su *best seller* publicado en 1925, Madame Saint Ange propaga otra tradición: "Para conservar muy verdes las judías se requiere, como en la alta cocina, un cacharro de cobre no estañado. El estaño descompone el principio químico del color verde".

Las ideas empíricas sobre el efecto de los ácidos y los metales persisten vigentes entre el pueblo. Según Paul Bocuse, para mantener el verdor se utiliza un recipiente a ser posible de cobre, pues este metal tiene la propiedad de reavivar la clorofila. Alain Ducasse aconseja no mezclar de antemano las judías con la vinagreta, porque ésta altera su color.

Los expertos del centro de investigación que Nestlé tiene en Vers-chez-les-Blanc han desarrollado un método para analizar las modificaciones que la clorofila y sus derivados sufren durante el procesado de los vegetales. Han identificado el efecto de ciertas sales metálicas sobre el color de aquéllos.

El verdor de los vegetales se debe a las moléculas de clorofila de sus células. Cuando las judías se iluminan con luz blanca, las moléculas de clorofila absorben cierto rango del espectro visible; ello les confiere el color verde. La clorofila debe su capacidad de absorción de la luz a su estructura química: contiene un anillo porfirínico, en cuyo centro hay cuatro átomos de nitrógeno que rodean a uno de magnesio. La estructura guarda semejanza con la de la hemoglobina, si bien en ésta, que es la responsable del color rojo de la sangre, el centro lo ocupa el átomo de hierro, no de magnesio.



Ciertas reacciones químicas cambian el color de esa categoría de moléculas: en medio ácido, el átomo central de magnesio se reemplaza por uno de hidrógeno. Así acontece cuando se cuecen las judías en presencia de un ácido y, sin duda, cuando se sumergen demasiado tiempo en una vinagreta: la clorofila se transforma en feofitina, un compuesto que confiere a las judías un color amarillo pardo poco apetitoso. La adición de bicarbonato, que torna básica la solución (es decir, reduce la concentración de iones hidrógeno), evita el amarilleo.

El átomo de magnesio puede reemplazarse por otros metales. Lo habían observado ya los cocineros que utilizaban "recipientes para reverdecer", en los que el cobre, que sustituía al magnesio en la molécula, confería a las judías un "fresco" color verde. La industria alimentaria del siglo XIX utilizaba sulfato de cobre para evitar el amarilleo de las conservas, pero el tratamiento se prohibió debido a la toxicidad del metal.

La degradación de la clorofila durante la cocción de los vegetales constituye un problema industrial. Dado que los consumidores juzgan el frescor de los vegetales por su color, numerosos equipos de investigación se han centrado en el estudio de la estabilidad de la clorofila y en la búsqueda de coadyuvantes distintos del cobre: el hierro o el estaño les confieren una coloración gris parda, pero el cinc da un bello color verde.

En el proceso patentado "Veri-Green", las judías se blanquean (se escaldan durante unos minutos) para inhibir las enzimas que degradarían la clorofila y luego se cuecen en presencia de sales de cinc. Se ha atribuido la eficacia del proceso a la formación de compuestos de cinc, más resistentes a los ácidos y al calor que los compuestos de magnesio.

La llegada de la cromatografía líquida de alta resolución acoplada a la espectrometría de masas, así como de otros métodos de análisis modernos, ha facilitado la investigación sobre estos complejos.

A. Gauthier-Jacques y sus compañeros, del Centro de Investigación de Vers-chez-les-Blanc, han estudiado también las espinacas, de las que se extraen los pigmentos. La primera etapa del análisis, la cromatografía líquida, corresponde a la versión refinada del experimento que se realiza en los laboratorios escolares. Este se basa en machacar hojas y depositar una gota del líquido que desprenden en un papel de filtro, que se sumerge por su parte inferior en un disolvente orgánico, como el éter de petróleo. Al subir por capilaridad, el éter de petróleo separa los diferentes pigmentos porque los arrastra a velocidades distintas, en función de su tamaño molecular y solubilidad. La cromatografía líquida sigue el mismo principio, pero el arrastre y separación de los productos se realizan en el interior de una columna. La espectrometría de masas, colocada después de la columna cromatográfica, determina la masa de las moléculas que se han separado.

Mediante esa técnica analítica se han identificado más de 25 compuestos derivados de la clorofila, que se generan al calentarla. Junto a las clorofilas figuran las feofitinas, en las que se ha perdido el átomo de magnesio. Los otros compuestos derivan de los primeros por eliminación de un fragmento, de menor o mayor tamaño, de la molécula.

El estudio muestra, sobre todo, el efecto estabilizador del cinc sobre los derivados de la clorofila. Provistos de tal instrumento analítico, los químicos podrán precisar las condiciones óptimas de cocción de las judías verdes. Los cocineros, por su parte, confirmarán que tenían razón cuando evitaban las cocciones largas, el estaño, el hierro y los ácidos.

LIBROS

Galileo
Mecánica

GALILEO GALILEI. LE MECANICHE. Edizione critica e saggio introduttivo di Romano Gatto. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 2002.

DOMINGO DE SOTO AND THE EARLY GALILEO, por William A. Wallace. Ashgate; Aldershot, 2004.

THE RECEPTION OF THE GALILEAN SCIENCE OF MOTION IN SEVENTEENTH-CENTURY EUROPE. Dirigido por Carla Rita Palmerino y J.M.M.H. Thijssen. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2004.

RETRYING GALILEO, 1633-1992, por Maurice A. Finocchiaro. University of California Press; Berkeley/Los Angeles, 2005.

Le Mecaniche es el título asignado a una obra fundamental de Galileo que él nunca dio a la imprenta. Se lo impuso en 1891 Antonio Favaro, impulsor de la edición nacional italiana de las *Opere di Galileo Galilei*, a un tratado compuesto por éste en sus tiempos de docente en el estudio general de Padua, en todo caso antes de 1599. Romano Gatto ha preparado una excelente edición crítica con los 18 manuscritos que se conocen. Se nos ha legado en una versión breve (cuatro manuscritos) y en una versión larga (catorce manuscritos). Además de en su extensión, las versiones difieren, sobre todo, en la exposición. Sólo en la larga se emplea una demostración geométrica sistemática.

La mecánica del tiempo de Galileo era, en puridad, un saber sobre las máquinas, desarrollado históricamente a través de un enfoque dinámico, que atendía a los movimientos de las máquinas simples (balanza, romana o alzaprima), y un enfoque estático, que despreciaba el movimiento para ceñirse a los centros de gravedad. Una y otra perspectiva prolongaban comienzos clásicos: la primera o dinámica se remontaba al tratado *Sobre las cuestiones mecánicas*, del Pseudoaristóteles, y la segunda o estática, al tratado *Sobre el equilibrio de las figuras planas* o bien *Sobre los centros de gravedad de las figuras planas*, de Arquímedes. El Pseudoaristóteles se atribuyó hasta el siglo XIX al estagirita por su defensa del lugar natural y la consiguiente consideración de lo pesado y leve como propiedades internas de los cuerpos. Con la obra arquimedeana, el estudio del equilibrio de los cuerpos se reduce a una teoría matemática.

Para el autor de las *Cuestiones mecánicas*, los problemas abordados pertenecen por igual a la matemática y a la física: cuando rompemos el equilibrio de una balanza al intervenir en uno de los brazos, se provoca un movimiento circular en torno al fulcro; por tanto, el principio mecánico de la balanza debe buscarse en las propiedades del círculo. (La palanca y otras máquinas sencillas son reconducibles a la balanza.) Arquímedes, en cambio, conceptuó la mecánica entre las ciencias deductivas. Construyó una teoría matemática del equilibrio de las figuras planas. Su tratado de los *Equiponderables* bascula sobre siete postulados, tres extraídos de la experiencia y los cuatro restantes basados en propiedades de las figuras planas. Ambas obras, traducidas al latín, con comentarios directos o indirectos de Guidobaldo dal Monte, sirvieron de inspiración a Galileo. Más aún, el principio arquimedeano de la proporcionalidad inversa de las fuerzas operantes con respecto a la distancia al fulcro recibe en la versión larga una demostración original y rigurosamente geométrica. Con Galileo asistimos a la superación de la teoría aristotélica de los lugares naturales. Pero subraya que nada sucede contra la naturaleza, que no puede ser engañada.

Estructura su nueva mecánica en definiciones y suposiciones. La primera definición concierne a la gravedad, término que había empleado en el *De motu*, sin haber acotado su significado. En la versión larga de *Le Mecaniche*, por gravedad se entiende no sólo el *pondus* ("pesantez") de un cuerpo, sino también la fuerza ejercida por el mero hecho de ser pesado (*potentia*). Establece una relación entre *gravitas* y velocidad; cuanto mayor aquélla, más célere ésta. Gravedad, propiedad intrínseca de los cuerpos materiales en cuanto materiales, es su inclinación natural, su propensión, a caer. La segunda definición atañe al momento. También éste es propensión de los cuerpos a ir hacia abajo. Pero velocidad y momento se distinguen por el efecto que ejercen. La gravedad define la tendencia descendente, en tanto que el momento aumenta el ímpetu, la violencia con que los cuerpos caen. El momento, además, se relaciona con la distancia: acercarse o alejarse de un punto fijo aumenta o disminuye el momento. La tercera definición corresponde al centro de gravedad: punto en torno al cual se constituyen partes de iguales momentos. Es decir, aquel punto en que puede considerarse concentrada la masa del cuerpo, o punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas que operan sobre el cuerpo.

La postrera publicación de Galileo, sus *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla mecanica e i movimenti locali* (1638), marca el rumbo de la física que emerge, con una nueva doctrina del movimiento. Avancemos de entrada que, en puridad histórica, la ley de Galileo sobre el movimiento de caída libre, que establece que el espacio recorrido por un cuerpo descendente es proporcional al cuadrado del tiempo invertido en ese camino y constituye una de las primeras leyes

matemáticas, empíricamente verificables de la naturaleza, no encontró ni inmediata ni universal aprobación.

Aunque publicada en 1638, esa ley del movimiento aparece ya en los manuscritos galileanos fechados en un momento inmediatamente posterior a 1604. Pero la había establecido decenios antes Domingo de Soto (*Domingo de Soto and the Early Galileo*). ¿La tomó Galileo de ese fraile dominico español? ¿Y quién era Soto? Nacido en Segovia en 1494, empezó su formación filosófica en la Universidad de Alcalá. Tras obtener el título de bachiller en 1516, se trasladó al Colegio parisiense de Santa Bárbara, donde, bajo la tutoría de Juan de Celaya, se familiarizó con la física terminista, allí en boga. En París se relacionó con John Major, nominalista, y con Francisco de Vitoria, tomista. Volvió a Alcalá en 1519, en cuyo Colegio de San Ildefonso enseñó filosofía hasta 1524, cuando decidió ingresar en la Orden de Predicadores.

Soto estableció que el movimiento de caída libre era un movimiento *uniformiter difformis* (uniformemente acelerado) con respecto al tiempo en 1551, en sus cuestiones disciplinares sobre el libro séptimo de los *Físicos* de Aristóteles. Semejante introducción, de soslayo y de forma imprevisible, entraña lo que Alexander Koyré denominó el "enigma de Domingo Soto", convincentemente descifrado por William A. Wallace en numerosos trabajos. Hasta entonces, la expresión se reservaba para designar constructos lógicos, sin referencia con el mundo físico; se empleaba también para aludir a una doble "deformidad", o falta de uniformidad, a saber, respecto al espacio y respecto al tiempo. Wallace ha buceado en la posibilidad de que Soto hubiera sometido a contrastación experimental su hallazgo pionero.

Según es sabido, Galileo sostuvo al menos dos teorías sobre el movimiento de caída libre de los cuerpos. La basada en el método de los indivisibles fue desarrollada en los *Discorsi*. Para acercarse a la otra hay que acudir a cierto pasaje, un tanto críptico, donde habiendo demostrado la ley de cuerdas en el teorema VI del tercer día, añade una nueva prueba *ex mechanicis*; esta teoría mecánica se inicia en sus primeros trabajos sobre el plano inclinado. Allí, admitida la equivalencia entre el plano y una balanza de brazos doblados, compara los diferentes momentos de gravedad del mismo cuerpo en planos diversamente inclinados. Los momentos de gravedad en planos que poseen la misma altura e inclinación diferente son inversamente proporcionales a la longitud respectiva de sus planos. Galileo terminó por preferir el método de los indivisibles porque, a diferencia del enfoque mecánico, le permitía comparar movimientos que no arrancaran de la posición de reposo.

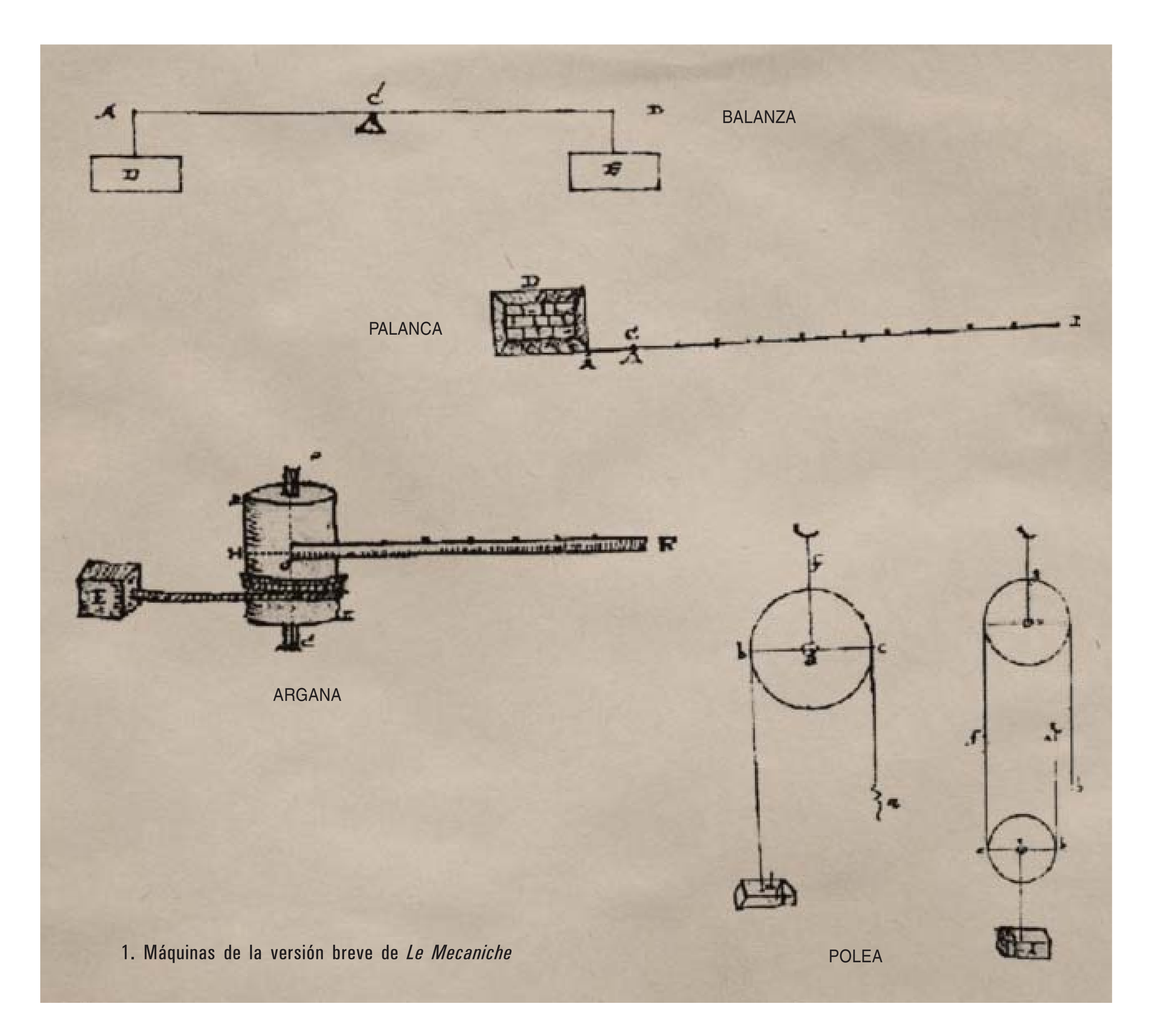
En carta no menos famosa a Paolo Sarpi, de 16 de octubre de 1604, Galileo sostiene que puede derivar todas las propiedades del movimiento de la caída de los cuerpos, incluida la ley fundamental $s \sim t^2$, a partir del principio que enuncia que la velocidad instantánea (el grado de velocidad) es proporcional a la distancia recorrida desde el inicio de la caída. Pero Galileo abandonó la errónea creencia en la proporcionalidad entre velocidad y espacio, a favor de la hipótesis correcta de una proporcionalidad entre velocidad instantánea y tiempo transcurrido.

¿Qué fortuna corrió en Europa la teoría de Galileo sobre el movimiento? ¿Qué argumentos físicos, matemáticos y ontológicos se esgrimieron a favor y en contra de la misma? En *The Reception of the Galilean Science of Motion in Seventeenth-Century Europe* se agavillan esclarecedoras aportaciones sobre la mecánica del siglo XVII. En el trasfondo, y bañándolo todo, la polarización de Richard Westfall entre mecánica matemática y filosofía mecánica.

El adjetivo "mecánico" se predicaba de formas diversas en los albores de la Modernidad. En un sentido general indicaba lo "relativo a la actividad manual", con o sin la ayuda de instrumentos; en un sentido técnico, designaba lo perteneciente a la ciencia de las cinco máquinas simples, incluidos su proyecto, construcción y operación. Por mecánica matemática se entendía, de preferencia, la presentación y resolución geométrica de los problemas con el auxilio de herramientas. Por su parte, la expresión "filosofía mecánica", elevada a categoría por Robert Boyle en 1661, tuvo numerosos antecedentes, entre ellos del mismo René Descartes que en 1637 hablaba ya de "mechanica philosophia mea". Hacia mediados del siglo XVII, el sustantivo "mecánica" designaba ya la ciencia del movimiento y, puesto que el movimiento constituía el objeto primero de la filosofía natural, vino a significar el núcleo de la filosofía natural.

Descartes subsume la mecánica en la física. Por la época, 1618-1619, en que trabó amistad con él, Isaac Beeckman, un estudioso holandés que había venido investigando la aceleración de la caída de los cuerpos y quedó sorprendido con las dotes matemáticas del joven francés, se hallaba interesado por los problemas de las matemáticas mixtas. Era también un atomista convencido, que negaba la posibilidad de acción a distancia y atribuía el magnetismo y la pesantez a un mecanismo corpuscular. Ambos intercambian cuestiones y problemas. Entre los relacionados con la mecánica: ¿por qué permanece erguida la cabeza de una peonza?, ¿de qué modo se acelera una piedra en caída libre?, ¿se conserva o no el movimiento?, ¿cuál debe ser el peso en el agua en las diferentes embarcaciones? Descartes nunca rechazó explícitamente la distinción entre movimiento natural y movimiento violento, entre cosas naturales y cosas artificiales. Presupone la existencia del vacío y de una gravedad inherente a los cuerpos, sin cuestionarse la realidad del vacío o la gravedad.

En las *Regulae ad directionem ingenii* no se presenta, sin embargo, ningún nuevo elemento en relación con la mecánica. Lo que movió a Descartes a escribir las *Regulae*, entre 1619 y 1629, fue el descubrimiento de la unidad de todas las ciencias y el proyecto consiguiente de un conocimiento universal. Su "mathesis universalis" descansa en un proceso de abstracción, donde todo se concibe bajo la especie de cantidad matemática. En las *Reglas*, la matemática se emplea de una manera simbólica, sin comportar ninguna reforma ontológica de la física. A comienzos de los años treinta, recurrió a la doctrina de las verdades eternas para fundamentar la identidad de la física y la matemática: las verdades matemáticas son leyes de la naturaleza establecidas por Dios. Se niega la diferencia entre el objeto de la matemática y el objeto



1. Máquinas de la versión breve de *Le Mecaniche*

de la física, así como entre sus respectivos grados de certeza.

Se refiere al quicio sobre el que reposa la física con diversas expresiones equivalentes: "reglas de movimiento", "leyes de la mecánica", "leyes de la física" y "leyes de la naturaleza". Sobre la mecánica y cuestiones relacionadas con la misma se destacan varias epístolas cuya extensión se acerca a la de un breve tratado. De las dos aquí pertinentes —una *Explication des engins par l'aide desquels on peut avec une petite force lever un fardeau fort pesant*, que Descartes envió a Constantin Huygens el 5 de octubre de 1637, y un *Examen de la question savoir si un corps pèse plus o moins, étant proche du centre de la Terre q'en étant loin*, remitido a Mersenne el 13 de julio de 1638— suele singularizarse la enviada al fraile mínimo porque trata de la "cuestión geostática" y contiene los principales puntos de la primera.

El cultivo de la mecánica había sido un asunto predominantemente italiano, con la excepción significativa del comentario de Henri de Monantheuil a las *Cuestiones mecánicas* (1599), y alguna otra rara aportación. Pero cuarenta años después, asistimos a un giro completo de la situación, auspiciado por la capacidad de convocatoria de Mersenne. En el mismo año de 1634, Albert Girard publicó una traducción francesa de las obras de Simon Stevin; entre ellas, *La Statique ou Art pondéraire*; Mersenne tradujo al francés y publicó las *Mecaniche* de Galileo; Pierre Hérigone sacó un *Cours de mathématiques*, que incluía una parte sobre mecánica en el tercer tomo, que se convirtió en punto de referencia de la enseñanza en Francia por el resto del siglo. Dos años después, Gilles Personne de Roberval escribió su *Traité des mécaniques*.

En 1635, Jean de Beaugrand, discípulo de Viète, proponía que un cuerpo pesaba menos cuando se hallaba cerca del centro de la Tierra que cuando se encontraba lejos. En esa proposición "geostática" se amasaban tesis de estática con la aserción de que los cuerpos pesados tienden hacia el centro del mundo; ello significaba que las verticales eran líneas convergentes. Un año después aparecía la *Geostatice* de Beaugrand, objeto de acalorados debates en el



2. Galileo Galilei 1564-1642

círculo de Mersenne, con la intervención de Fermat, Etienne Pascal y otros. Descartes, que no participó en el debate hasta 1638, distingue entre pesantez absoluta y pesantez aparente y relativa. Lo ilustra con el ejemplo del palo: asido por un extremo da la sensación de pesar más que si se ase por el medio, pese a que en ambos casos hablemos del mismo palo con el mismo peso absoluto. La pesantez relativa es la fuerza necesaria para sostener un cuerpo en determinada posición. En última instancia, busca una axiomatización, a partir de la proporcionalidad entre causa y efecto.

La ley galileana de la caída de los graves fue considerada una fórmula matemática abstracta por Descartes, que no aportaba una explicación física de la gravedad ni podía reconciliarse con ella. En *Le Monde* rechazó la noción de vacío porque implicaba la noción mágica y obscura de acción a distancia. El peso no constituía ninguna propiedad intrínseca de la materia como habían sostenido los aristotélicos, sino que era el resultado de la atracción de la Tierra. El mecanismo de la caída libre se explicaba por la acción de contacto. En 1640 Descartes le admitiría a Mersenne que no podía determinar la velocidad con que caen los cuerpos pesados porque ello dependía de la velocidad desconocida de la materia sutil en los torbellinos que crean el universo.

A diferencia de Descartes, quien, acabamos de decirlo, consideraba la teoría galileana del movimiento una abstracción matemática, sin correlación directa con el comportamiento real de los cuerpos, Pierre Gassendi no cuestionó nunca la validez de esa teoría. Más aún, se empeñó en dar con una explicación causal de la gravedad. En octubre de 1640, abandona el puerto de Marsella en un trirreme para realizar, en mar abierto, un experimento que Galileo había descrito, sin llevarlo a la práctica, en el *Dialogo sopra i due massimi sistemi*. Gassendi confirmaba la hipótesis: una bola caída desde la cabeza de un mástil de una embarcación aterrizaba exactamente en el pie del mástil. Se trataba de una observación preñada de importantes implicaciones, porque refutaba uno de los principales argumentos contra el movimiento diurno de la Tierra. Los partidarios de la cosmología de Ptolomeo y los de la de Tycho Brahe proponían que la bola caería sobre cubierta a cierta distancia del pie del mástil; por tanto, en una Tierra en rotación un objeto caído desde lo alto de una torre no daría en la base de ésta.

Gassendi expuso su visión del pensamiento de Galileo en unas cartas, publicadas en latín entre 1642 y 1646. Una de las principales novedades introducidas en sus *Epistolae* era la identificación de la gravedad con la fuerza de la Tierra, la *vis attrahens*. Ese reconocimiento de la naturaleza externa de la gravedad le permitió introducir, en las *Epistolae de motu impresso a motore translato* (1642), un enunciado correcto del principio de inercia rectilínea, una tesis hoy muy controvertida. En las *Epistolae de proportione qua gravia decidentia accelerantur* (1646), aporta la explicación física y el análisis matemático de las *Epistolae de motu*. Gassendi influyó en Thomas Hobbes, quien, en *De corpore* (1655), defiende una versión modificada de la tesis del movimiento de caída libre por atracción terrestre.

Pero el devenir histórico del pensamiento galileano trasciende el marco estricto de la física para convertirse, constituido en "el caso Galileo", en metáfora de la cultura occidental. Maurice A. Finocchiaro (*Retrying Galileo*) ha abordado la primera revisión general del mismo desde 1633, fecha en que terminó el juicio más citado de la historia, hasta 1992, año en que Juan Pablo II rehabilitó su figura. Por sus páginas pasan las opiniones y comportamiento de filósofos, científicos e incluso políticos y literatos.

En una autorizada reseña de esa obra, William R. Shea recordaba hasta qué punto se ha tomado por bandera ese acontecimiento. En el siglo XVII, la Reforma protestante lo empleó para atacar al Papado, cien años más tarde la Ilustración secular lo enarboló para apalizar al Cristianismo en general, una centuria después era el recurso común esgrimido contra toda forma de religión. Dictaba el aforismo dominante que no cabía progreso sin extinción de las creencias religiosas. En el siglo XVII se daba por descontada la veracidad directa del texto escriturista, salvo que hubiera razones muy poderosas para otorgarle un sentido traslaticio o metafórico. Si los sentidos, decía la filosofía, son el primer medio de conocimiento, no engañan, pues, y nos informan del orto y del ocaso solar, ¿por qué no creer que fuera la realidad? Para defender el movimiento de rotación, Galileo se fundaba en las mareas, con una demostración devaluada tiempo más tarde. Pero eso ocurrió, en efecto, mucho más tarde.

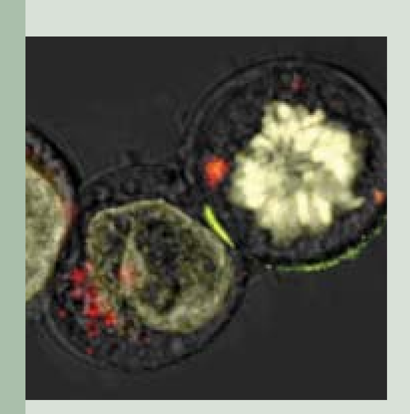
—LUIS ALONSO





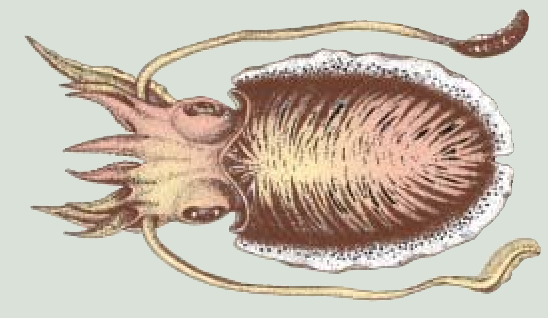
ACELERACION DE PLASMA, por Chandrashekhar Joshi

Un nuevo método de aceleración de partículas en el que éstas "surfean" sobre una onda de plasma promete un gran número de aplicaciones.



SINAPSIS INMUNITARIA, por Daniel M. Davis

Las imágenes de la interacción entre células inmunitarias muestran conexiones similares a las que utilizan las neuronas para comunicarse. El estudio de estas sinapsis arroja luz sobre las redes de intercambio de información que las células tejen para combatir enfermedades.



ESTRATEGIAS EVOLUTIVAS DE LOS CEFALOPODOS, por Angel Guerra

Asociadas a la reducción o pérdida de la concha, los cefalópodos actuales muestran una combinación de características que explican su éxito evolutivo.



COMBATIR EL CANCER MEDIANTE EL ESTUDIO DE LOS SARCOMAS, por Igor Matushansky y Robert G. Maki

Aunque raros, los cánceres de músculo, hueso o tejido graso portan los mismos errores moleculares que otros tumores. Ello les convierte en candidatos ideales para el descubrimiento de nuevas terapias.

PROTECCIONES PARA NUEVA ORLEANS, por Mark Fischetti

Mientras comienza la reconstrucción de la costa devastada por los huracanes Katrina y Rita, los ingenieros estudian cómo proteger Nueva Orleans y otras ciudades contra futuras tormentas y subidas del nivel del mar.

